Kosmos electronic radio-tech

Franckh-Kosmos
Verlags-GmbH & Co., Stuttgart
Made in Germany

Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co., Stuttgart / 1990

Technische Bildgestaltung: H. J. Badior, KOSMOS Entwicklungslabor, G. Bosch, Stuttgart.
Satz: typoservice, Achern
Printed in Germany / Imprimé en Allemagne Fédérale

kosmos

Experimentieranleitung
kosmos®
electronic ***radio-tech***

Von Hans-Jürgen Badior

Das große Labor für Radio- und Telekommunikations-Technik
mit Grundkurs electronic. Mehr als 170 Versuche.

Achtung! Rundfunkempfangsgeräte dürfen nur bereitgehalten werden, wenn sie ordnungsgemäß angemeldet sind. Formulare zur Anmeldung gibt es bei Banken und Sparkassen.

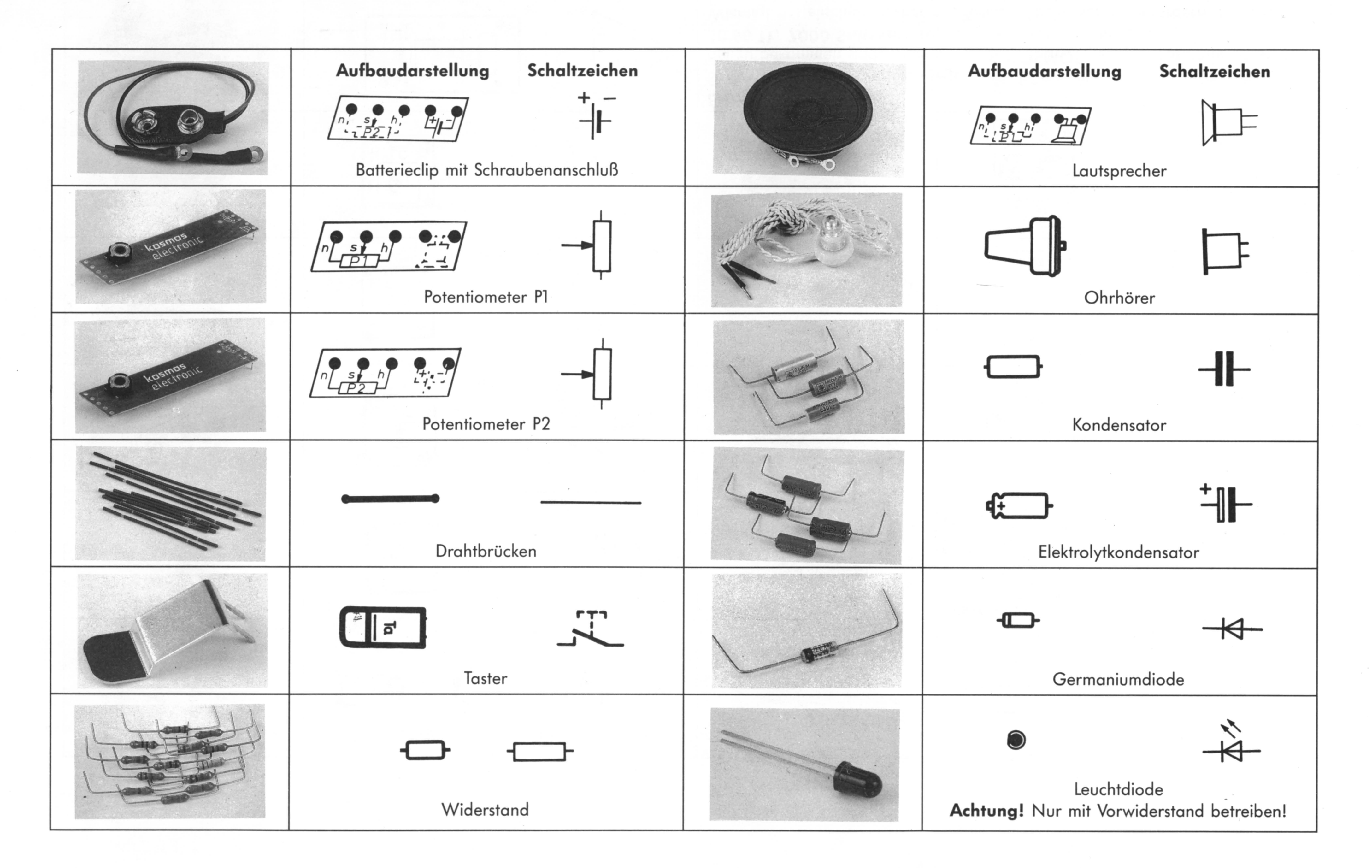
Zum Experimentieren wird eine 9-Volt-Batterie Type 6 F 22 gebraucht, die dem Kasten wegen ihrer begrenzten Lagerfähigkeit nicht beigegeben ist.

Achtung! Einzelteile dieses Sets haben spitze oder scharfe Ecken und Kanten. **Verletzungsgefahr!**

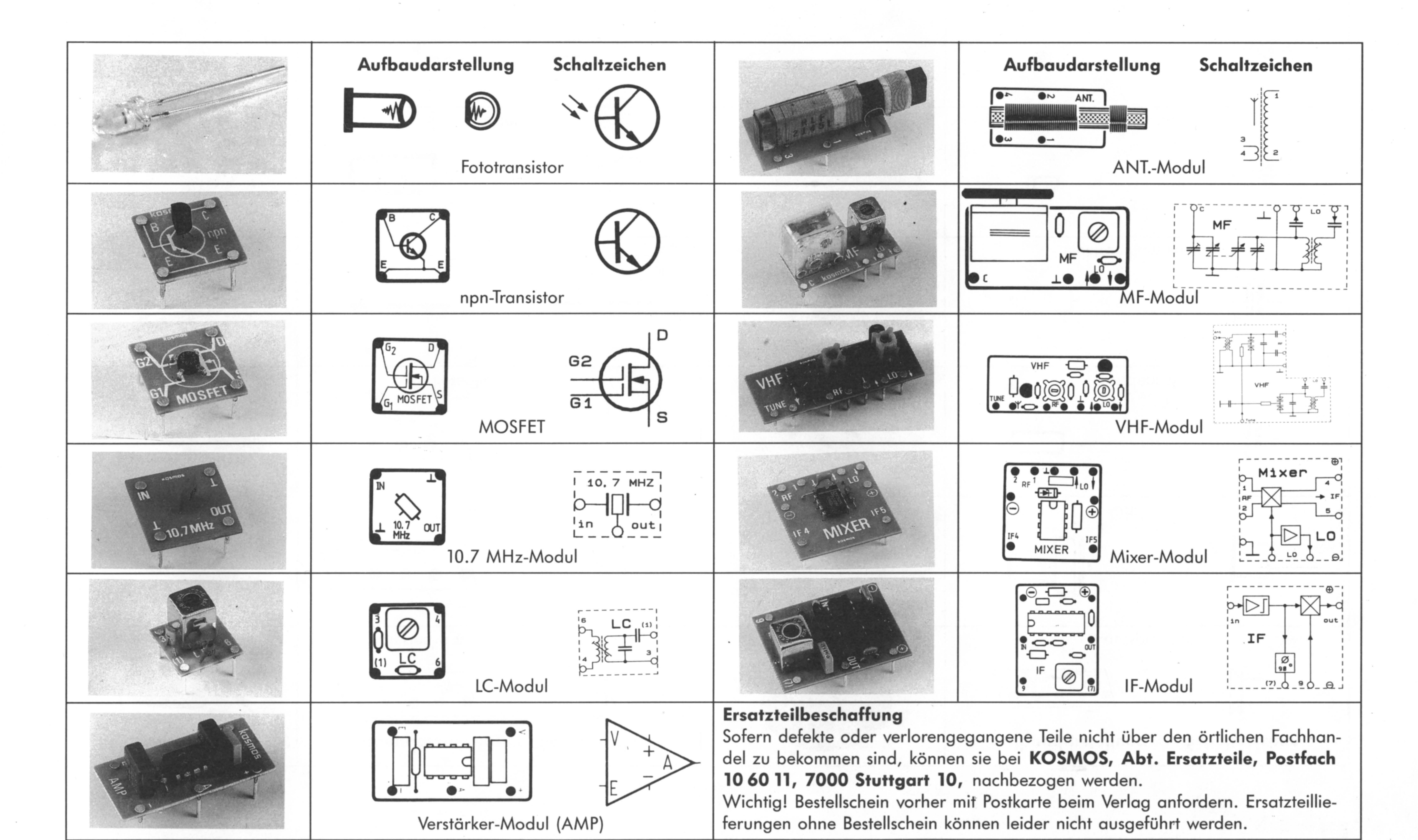
Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co., Stuttgart

A. Die Teile des Kosmos electronic *radio-tech*

Bild	Teil	Bild	Teil
	Steckplatte		Schaltpult
	Steckfedern		Dekorplatte DESK I
	Verbindungs-stifte		Drehknopf
	lange Drahtstücke		Abstimmrad
	Schrauben für Poti-Modul		Schraube für Abstimmrad



Aufbaudarstellung
Schaltzeichen
Batterieclip mit Schraubenanschluß
Potentiometer P1
Potentiometer P2
Drahtbrücken
Taster
Widerstand
Aufbaudarstellung
Schaltzeichen
Lautsprecher
Ohrhörer
Kondensator
Elektrolytkondensator
Germaniumdiode
Leuchtdiode
Achtung! Nur mit Vorwiderstand betreiben!



Ersatzteilbeschaffung

Sofern defekte oder verlorengegangene Teile nicht über den örtlichen Fachhandel zu bekommen sind, können sie bei **KOSMOS, Abt. Ersatzteile, Postfach 10 60 11, 7000 Stuttgart 10,** nachbezogen werden.

Wichtig! Bestellschein vorher mit Postkarte beim Verlag anfordern. Ersatzteillieferungen ohne Bestellschein können leider nicht ausgeführt werden.

Kosmos electronic

radio-tech



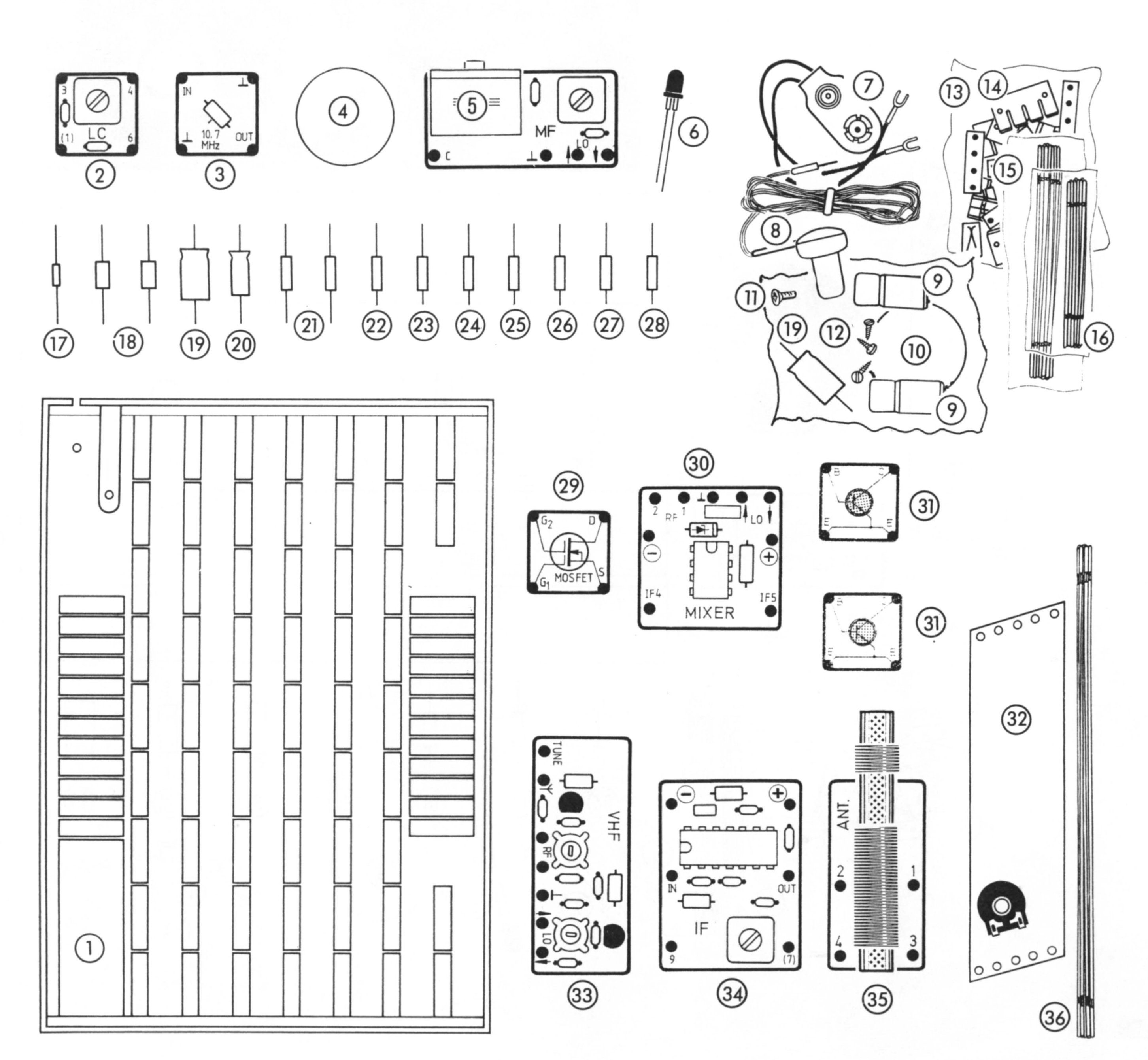
Bezeichnung	Bestell-Nr.
1. Dekorplatte DESK I	60-7001.6
2. Schaltpult	60-7015.7
3. Drei Zyl.-blechschrauben je	60-2018.8
4. Zwei Verbindungsstifte je	60-8372.7
5. Drehknopf, groß	60-8371.7
6. Leuchtdiode (LED rot)	60-0205.8
7. Fototransistor TF	60-0211.8
8. Beutel lange Drahtbrücken	60-0029.2
9. Beutel kurze Drahtbrücken	60-0028.2
10. Beutel Steckfedern	60-0061.2
11. Verstärker-Modul (AMP)	60-4303.6
12. Lautsprecher	60-4201.6
13. Poti-Modul(P1)	60-4302.6
14. Elektrolytkondensator 1 μF	60-0305.8
15. Elektrolytkondensator 10 μF	60-0335.8
16. Kondensator 100 nF (0,1μF)	60-0312.8
17. Widerstand 10 Ω	60-0450.8
18. Widerstand 100 Ω	60-0428.8
19. Widerstand 3,3 kΩ	60-0437.8
20. Widerstand 10 kΩ	60-0431.8

Technische Änderungen vorbehalten

Kosmos electronic
radio-tech

Bezeichnung	Bestell-Nr.
1. Steckplatte	60-7010.7
2. LC-Modul	60-4297.6
3. 10.7-Modul	60-4296.6
4. Drehknopf, groß	60-8371.7
5. MF-Modul	60-4290.6
6. Leuchtdiode (LED, grün)	60-0219.8
7. Batterieclip mit Schraubanschluß	60-4211.6
8. Ohrhörer	60-4205.6
9. Zwei Taster je	60-0036.7
10. Abstimmrad	60-8374.7
11. Schraube für Abstimmrad	60-2020.8
12. Drei Zyl.-blechschrauben je	60-2018.8
13. Beutel Steckfedern (33)	60-0061.2
14. Beutel Steckfedern (17)	60-0064.2
15. Zwei Beutel lange Drahtbrücken je	60-0029.2
16. Beutel kurze Drahtbrücken	60-0028.2
17. Germaniumdiode	60-0203.8
18. Zwei Kondensatoren 6,8 nF je	60-0326.8
19. Zwei Elkos 100µF je	60-0334.8
20. Elko 10 µF	60-0335.8
21. Zwei Widerstände 470 Ω je	60-0435.8
22. Widerstand 1 kΩ	60-0430.8
23. Widerstand 5,6 kΩ	60-0405.8
24. Widerstand 15 kΩ	60-0432.8
25. Widerstand 33 kΩ	60-0413.8
26. Widerstand 100 kΩ	60-0425.8
27. Widerstand 220 kΩ	60-0434.8
28. Widerstand 680 kΩ	60-0442.8
29. Mosfet-Modul	60-4295.6
30. Mixer-Modul	60-4292.6
31. Zwei npn-Transistor-Module je	60-4300.6
32. Poti-Modul (P2)	60-4305.6
33. VHF-Modul	60-4291.6
34. IF-Modul	60-4294.6
35. ANT.-Modul	60-4293.6
36. Bündel Drahtabschnitte	60-4110.2

Technische Änderungen vorbehalten

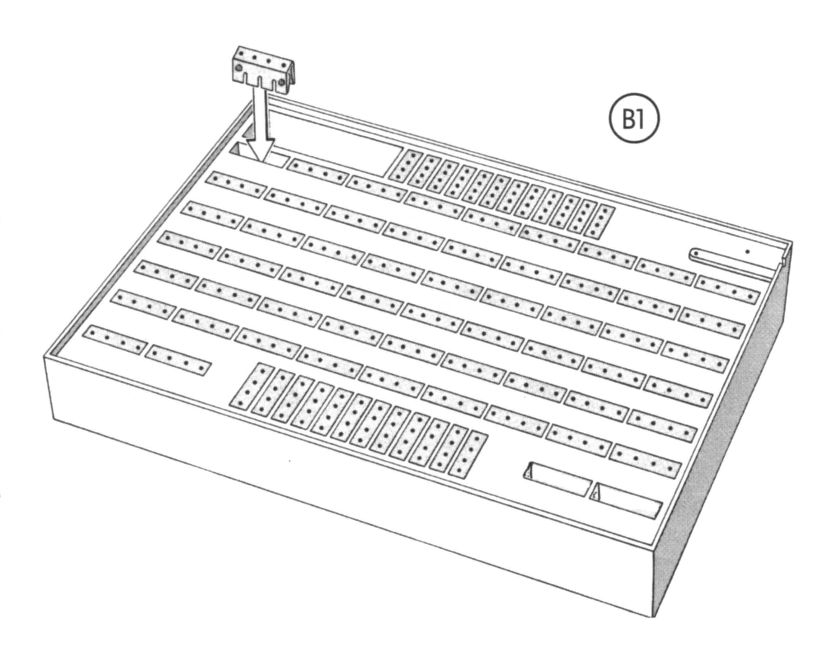


Inhalt **Seite**

B. Experimentiervorbereitungen

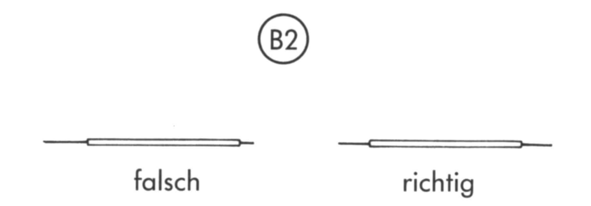
B.1 Steckfedern und Drahtbrücken

Steckfedern
Bild B1 zeigt, wie die Steckfedern in die Aussparungen auf der Steckplatte eingesteckt werden. Die Federn müssen hörbar einrasten!
Wichtig! In die beiden Aussparungen 10 und 11 rechts unten (Bild B1) werden zunächst keine Steckfedern eingesteckt. Sie werden im ersten Experiment außerhalb der Steckplatte benötigt.

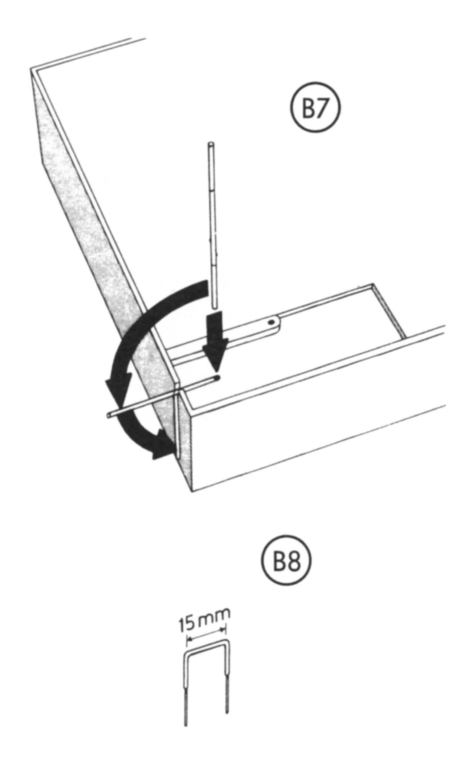


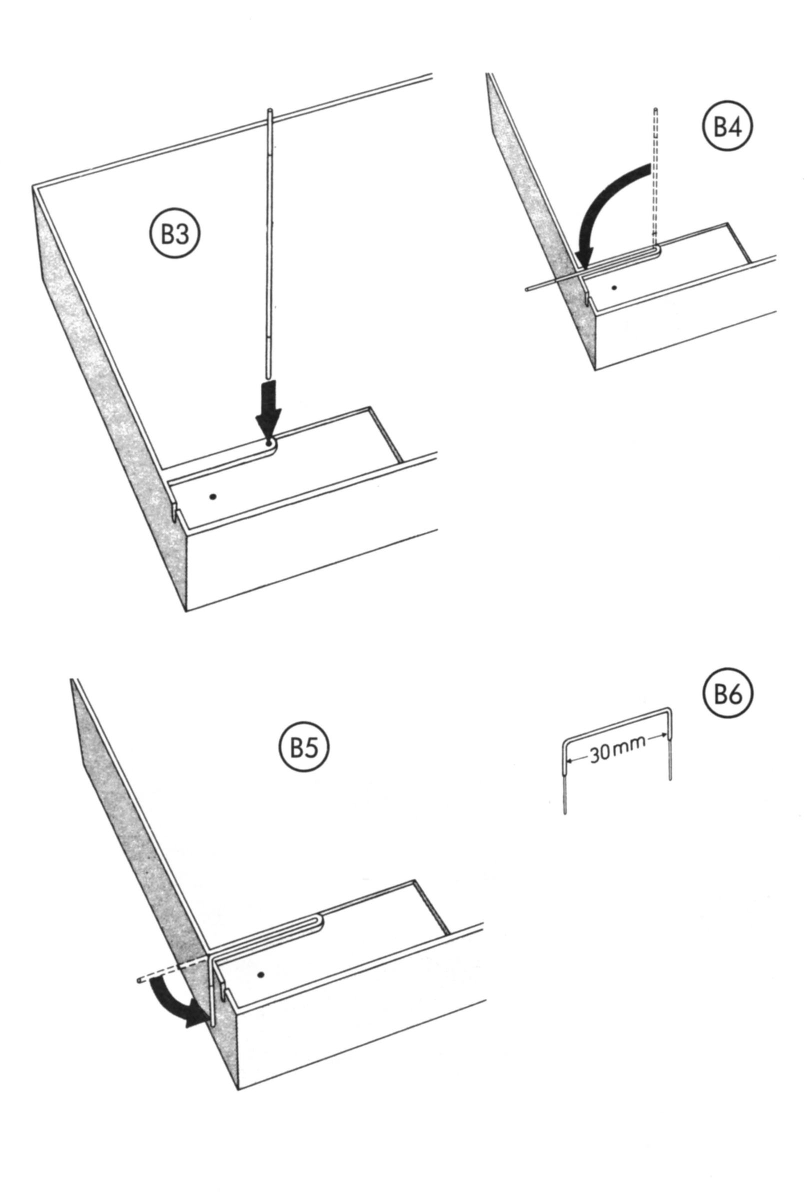
*Die Steckplatte und die Steckfedern bilden zusammen die Grundelemente für das universelle KOSMOtronik®-Stecksystem. In die Steckfedern können die verschiedenen Bauelemente und Module eingesteckt werden; die Federn stellen dabei den elektrischen Kontakt zwischen den einzelnen Bauteilen her und geben gleichzeitig den notwendigen mechanischen Halt. Hier noch ein Hinweis: Anschlußbeine und Drähte sollten **stets senkrecht** in die Löcher der Steckfedern eingesteckt werden, und die Drahtenden dürfen nicht verbogen sein, da sie sich sonst in den Steckfedern verhaken können.*

Drahtbrücken
Für die „Verdrahtung" werden beim Experimentieren kurze und lange Drahtbrücken verwendet, die zunächst nach den folgenden Anweisungen Schritt für Schritt auf die Rastermaße 30 mm und 15 mm zurechtgebogen werden müssen. Wir beginnen mit den längeren Drahtstücken.
Von beiden Enden der Drahtstücke wird die vorgekerbte Isolierung abgezogen. Die blanken Drahtenden sollten gleichlang sein (Bild B2).
Zum Biegen von 30-mm-Drahtbrücken wird ein langes Drahtstück in das kleine Loch auf dem Steg oberhalb des Schriftzuges KOSMOS eingesteckt (Bild B3).



Das Drahtstück wird dann rechtwinklig zum Plattenrand abgebogen (Bild B4).
Im letzten Arbeitsschritt wird das über den Plattenrand hinausragende Drahtende rechtwinklig nach unten gebogen (Bild B5).
Bild B6 zeigt eine fertige Drahtbrücke mit dem Rastermaß 30 mm.
Zum Biegen von 15-mm-Drahtbrücken wird ein kurzes Drahtstück in das kleine Loch unterhalb des Steges eingesteckt (Bild B7).
Es werden nun die gleichen Biege-Schritte, wie oben beschrieben, ausgeführt. Bild B8 zeigt eine fertige Drahtbrücke mit dem Rastermaß 15 mm.

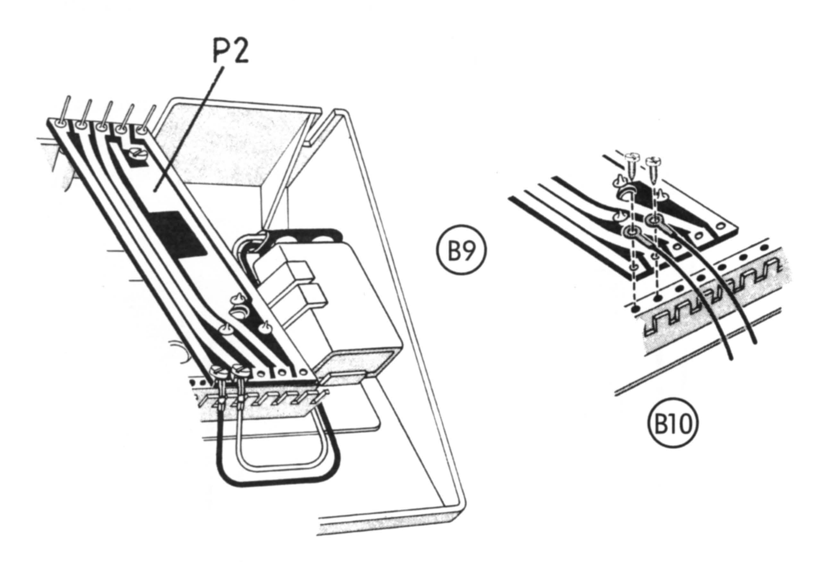




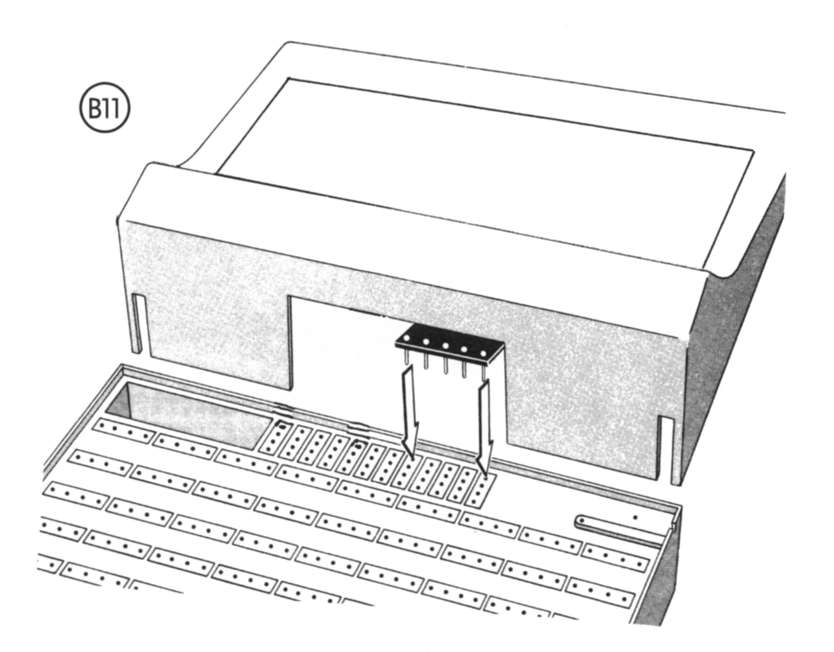
B.2 Montage des Pultgehäuses

Die Montage des Pultgehäuses erfolgt in zwei Abschnitten. Nach dem ersten Abschnitt werden erst einmal zwei Experimente durchgeführt.
Die Oberseite des Pultgehäuses wird zunächst mit einem Spülmittel von Fettspuren und Trennmittelresten aus dem Fertigungsprozeß gereinigt.

Wichtig! Das Spülmittel muß anschließend mit viel Wasser wieder abgewaschen und das Pultgehäuse gut trockengerieben werden.



Potistreifen P2
Das Pultgehäuse wird herumgedreht. Der Potistreifen P2 wird mit den fünf Stiften nach oben, wie in Bild B9 gezeigt, in den rechten Teil der Pultaussparung gelegt und mit einer Zylinderblechschraube befestigt. Zwei weitere Zylinderblechschrauben werden nach Bild B10 in die Ösen des Batterieclips und die linken Löcher des Potistreifens gesteckt und in das Pultgehäuse eingeschraubt. Die beiden Ösen müssen dabei satt auf den Leiterbahnen des Potistreifens liegen.
An die linke äußere Leiterbahn kommt die schwarze Leitung (Minuspol der Batterie), an die danebenliegende Leiterbahn kommt die rote Leitung (Pluspol der Batterie).
Wichtig! Diese beiden Anschlüsse dürfen keinesfalls vertauscht werden, da bei falscher Batteriepolung Bauteile zerstört werden können!
Bild B11 zeigt, wie das Pultgehäuse mit dem montierten Potistreifen P2 auf die Steckplatte aufgesetzt wird.
Wichtig! Statt der Batterie empfehlen wir die Verwendung des elektronisch stabilisierten und kurzschlußfesten KOSMOS Netzgerätes X. Dann muß die Batterie aber unbedingt vorher abgeklemmt werden (sonst Explosionsgefahr der Batterie!).
Die Anschlüsse des Netzgerätes werden in die beiden Steckfedern eingesteckt, die auf den Aufbauplänen jeweils mit + (Plus) und – (Minus) bezeichnet sind.



Damit ist der erste Abschnitt der Montage beendet, es sollten jetzt zunächst die Experimente „Die Funkbrücke" und „Wir katapultieren Salzkristalle" durchgeführt werden.

Lautsprecher
(In die beiden Aussparungen 10 und 11 können jetzt die Steckfedern eingesteckt werden.)

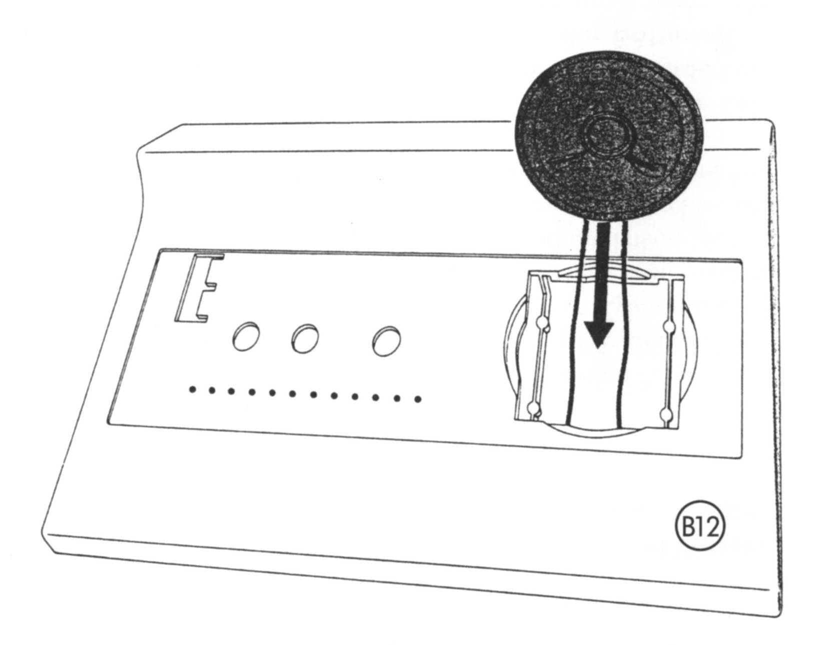
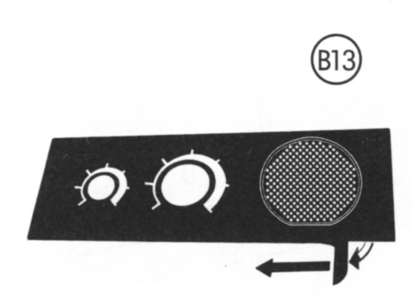
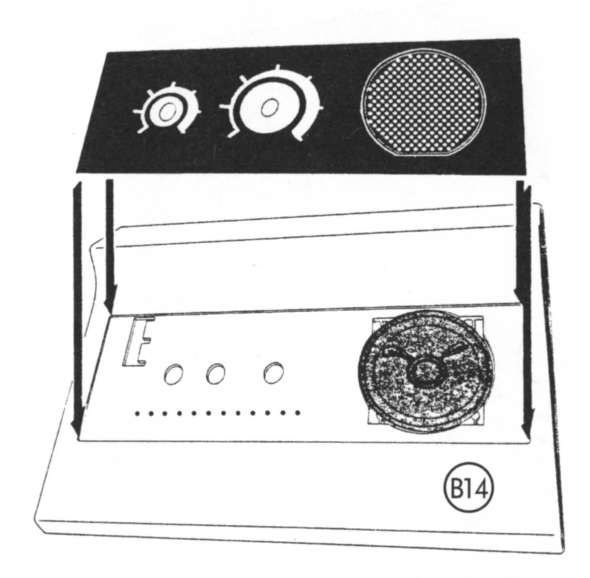


Bild B12 zeigt, wie der Lautsprecher von oben in das Pultgehäuse eingelegt wird. Die beiden Anschlußleitungen sollen dabei zur Pultvorderseite (nach unten) herausgeführt werden.

Dekorplatte
Von der Rückseite der Dekorplatte wird das Schutzpapier abgelöst. Wenn man eine Ecke der Dekorplatte vorsichtig in beide Richtungen biegt, läßt sich das Papier anfassen und leicht abziehen (Bild B13).



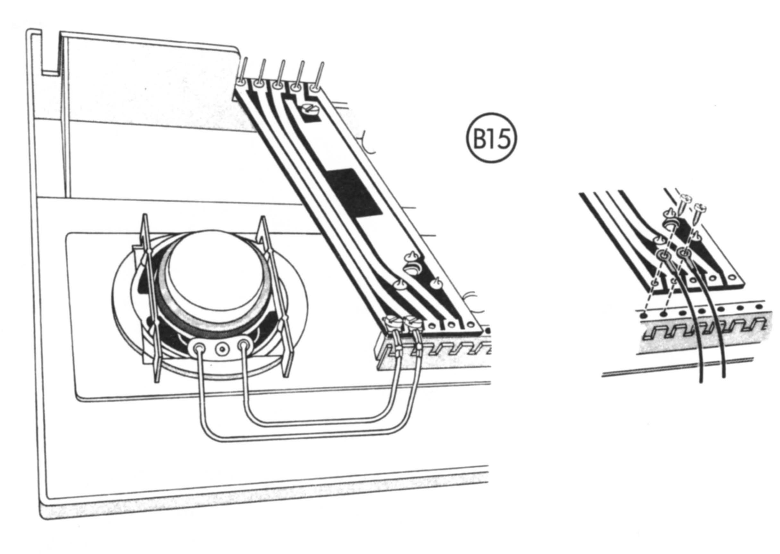
Wichtig! Die Klebefläche nicht mit den Fingern berühren.
Die Dekorplatte wird nun vorsichtig in die Vertiefung des Pultgehäuses eingepaßt und angedrückt (Bild B14).



Wichtig! Im Bereich des Lautsprechers darf nur am Rand gedrückt werden, da sonst die Dekorplatte mit der Lautsprechermembran verkleben kann.

Potistreifen P1
Das Pultgehäuse wird wieder umgedreht, der Potistreifen P1 links eingelegt und mit einer Zylinderblechschraube befestigt (Bild B15). Zwei weitere Blechschrauben werden dann in die Ösen der

Lausprecherkabel und die linken Löcher des Potistreifens gesteckt und in das Pultgehäuse geschraubt. Die beiden Ösen müssen dabei satt auf den Leiterbahnen des Potistreifens liegen.



Drehknöpfe

Die beiden Drehknöpfe werden von oben eingesteckt. Dabei ist auf die richtige Stellung der Achse und der Potiaufnahmen zu achten.

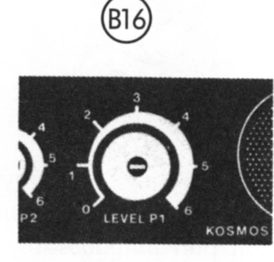
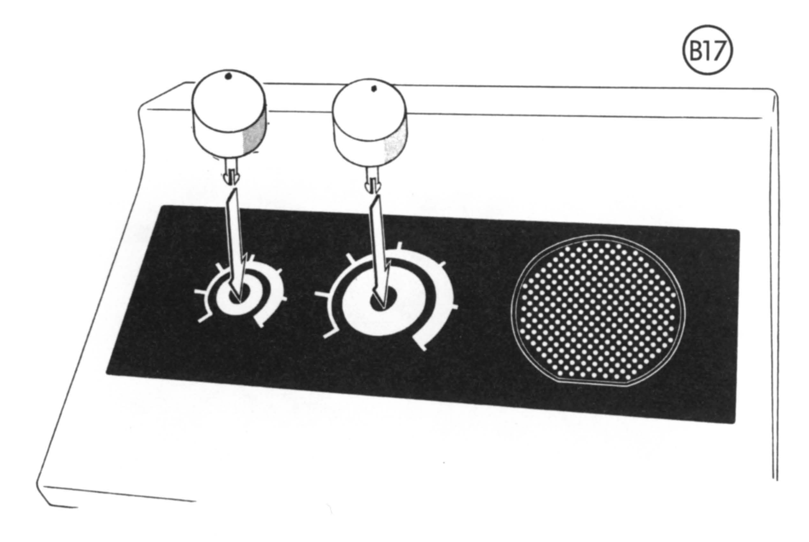
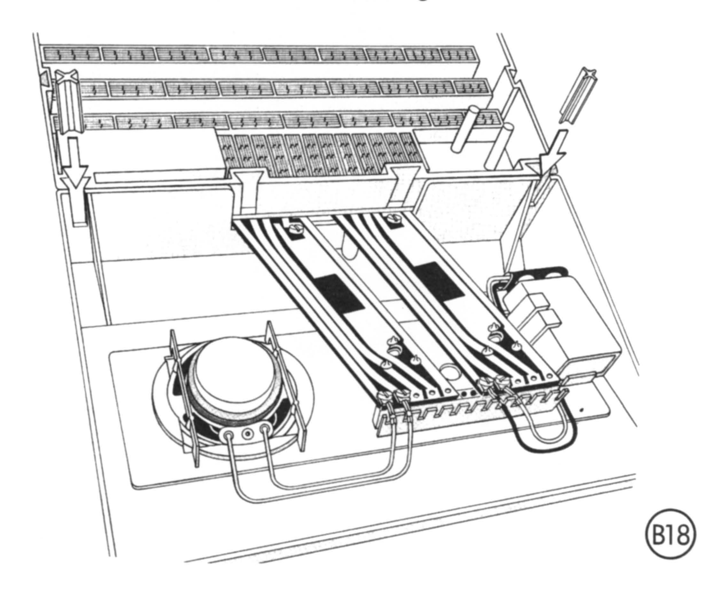


Bild B16 zeigt, in welche Stellung die Potiaufnahmen mit einem kleinen Schraubendreher gebracht werden müssen, in Bild B17 ist zu sehen, daß die Markierung der Knöpfe etwa zur Zahl Drei auf der Skala zeigen muß, damit die Knöpfe problemlos eingesteckt werden können.



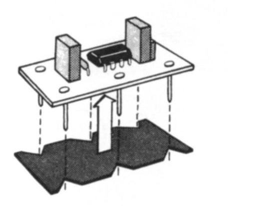
Verbindungsstifte

Die Verbindungsstifte gewährleisten eine feste Verbindung zwischen Pultgehäuse und Steckplatte. Bild B18 zeigt, wie die beiden Verbindungsstifte nach kompletter Montage des Pultgehäuses links und rechts mit sanftem Druck eingesteckt werden.



Module

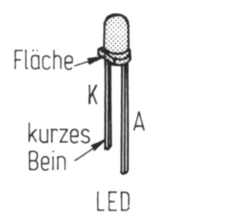
Nun werden für die größeren Module die Isolierplatten aus der Ausschneidetafel ausgeschnitten und unter die Module gelegt (Bild B19). Das verhindert Kurzschlüsse zwischen Steckfedern und Leiterbahnen der Module.




Isolierplatte unterlegen

LED

Besonders empfindliche Bauteile sind die Leuchtdioden: Niemals ohne Vorwiderstand betreiben! Die Lage der Anschlüsse A(node) und K(atode) zeigt Bild B20.





Albert Einstein

zur Eröffnung der 7. Funkausstellung 1930 in Berlin:

Wenn Ihr den Rundfunk hört, so denkt daran, wie die Menschen in den Besitz dieses wunderbaren Werkzeuges gekommen sind. Denkt an Maxwell, der die Existenz elektrischer Wellen auf magnetischem Wege aufzeigte, an Hertz, der sie zuerst mit Hilfe des Funkens erzeugte und nachwies.

1. Als der Funke übersprang: Der Beginn einer neuen Zeit

Die Raumfähre Columbia umkreist seit Tagen die Erde. Ein Forschungssatellit wird an Bord geholt. Zwei Astronauten arbeiten Seite an Seite in der geöffneten Ladebucht. Und doch können sie sich nur über Funk unterhalten. Jedes gesprochene Wort macht jäh am Visier der Helme halt. Das liegt nicht nur an ihren schweren Raumanzügen. Jenseits der Scheibe beginnt das Weltall! Ohne die uns umgebende Luft wären auch wir stumm. Sprache, Musik und jedwedes Geräusch ist an die Anwesenheit der Luft gebunden. Schall ist eine Erschütterung der Gasmoleküle, jener kleinen Teilchen also, die unsere Luft bilden. Ein Molekül schlägt an das andere und trägt so durch fortwährendes Anstoßen den Schall immer weiter fort. In einiger Entfernung ist aber dann schnell die Wirkung verpufft, und wir hören nichts mehr. Eine Unterhaltung – die Kommunikation – ist eben nur auf geringe Entfernung beschränkt. Das Telefon erlaubt uns die Kommunikation über eine größere Entfernung – die Telekommunikation. Meist werden dazu Kabel benutzt. Das Thema dieses Experimentierkastens ist aber die Technik der „drahtlosen" Telekommunikation, der freien Verbindung über Meere und Kontinente hinweg.
Szenenwechsel: Hundert Jahre vor dem Funkverkehr unserer Astronauten entdeckte der Karlsruher Physikprofessor Heinrich Hertz die später nach ihm benannten Funkwellen. Genauer gesagt, Heinrich Hertz wies nach, was schon immer auf natürliche Weise existiert hatte: die elektromagnetische Strahlung. Sie breitet sich so ungeheuer schnell aus, daß sie in einer Sekunde rund 7 1/2 mal um die Erde flitzen kann. In einer Reihe von genialen Experimenten konnte er beweisen, daß auch das Licht und die Wärmestrahlung „nahe Verwandte" sind. Auch „seine Wellen" gehorchten den optischen Gesetzen.
Dabei begann alles nur mit einem winzigen, kaum wahrnehmbaren Fünkchen. Die Weltsensation, die, wenn sie heute geschähe, sicherlich die Schlagzeilen der Zeitungen beherrschen würde, zeigte sich zunächst ganz unscheinbar.

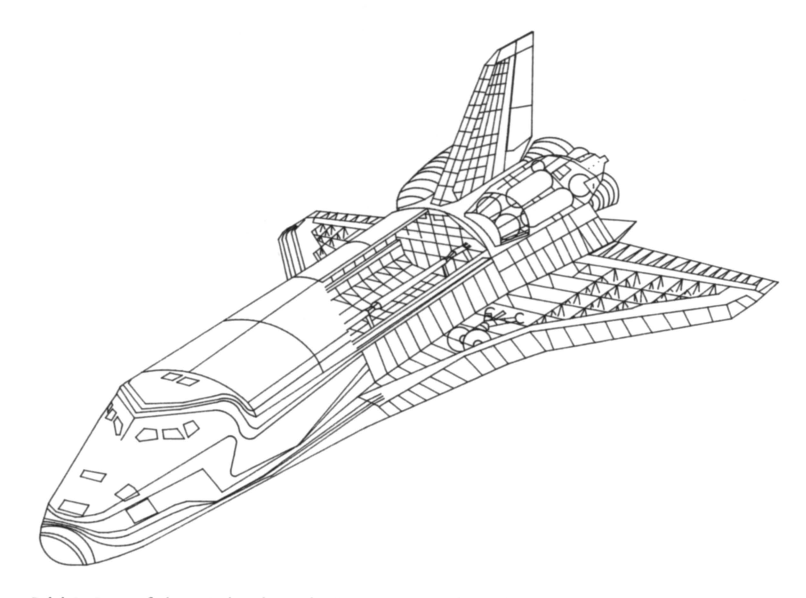


Bild 1. Raumfähre Columbia als Computergrafik. Die meisten Abbildungen dieses Buches sind mit Hilfe eines Computers entwickelt worden (CAD= Computer Aided Design).

Experimente

Funkbrücke

Wir stellen uns vor: Professor Heinrich Hertz hatte einen KOSMOS-Experimentierkasten. „radio-tech" konnte der wohl

noch nicht heißen, denn das Radio war ja noch gar nichtg erfunden; aber der Name soll hier keine Rolle spielen. Der Professor hat eine Reihe von wichtigen Journalisten eingeladen, denen er anhand eines unglaublichen Experimentes beweisen will, daß man „Signale" durch die Luft übertragen kann. Die Herren von der Presse kichern, halten es einfach für lächerlich, daß durch die Luft etwas passieren soll. Diese spinnerten Professoren sorgen doch immer wieder für Unterhaltung! Unbeirrt beginnt Heinrich Hertz, den von ihm erfundenen Funkensender nach Bild 2 auf der Steckplatte aufzubauen. Die Batterie schließt er erst ganz zum Schluß an, nachdem er nochmal gründlich überprüft hat, ob alle Teile richtig gesteckt sind. Den Empfänger bringt der Professor behelfsmäßig auf der Styroporeinlage der Verpackung unter. Zunächst stellt er Sender und Empfänger so dicht wie möglich nebeneinander, so daß die Antennendrähte etwa parallel liegen.

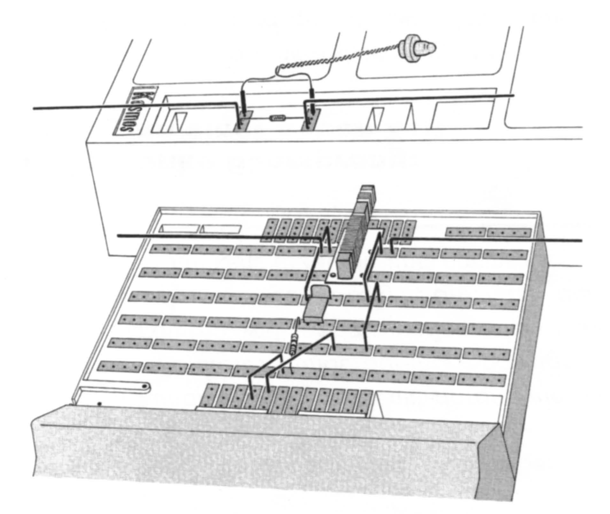


Bild 2. Die Nachbildung des genialen Versuches von Heinrich Hertz. Wir verwenden den 10-Ω-Widerstand des Bauteilepacks Kosmos II (er ist mit den Farbringen braun-schwarz-schwarz gekennzeichnet), einen Taster und die Ferritantenne auf der Steckplatte als Sender. Der Empfänger wird in der Styroporeinlage der Verpackung mit Hilfe der beiden zurückbehaltenen Steckfedern aufgebaut. Das Bauteil zwischen den beiden Antennendrähten ist die Diode Ge vom Bauteilepack Kosmos I.

Das hämische Geraune der Journalisten verstummt, denn jetzt drückt der Professor feierlich den Taster, und das Unglaubliche geschieht: Jeder, der in den Ohrhörer hineinlauscht, kann leise, aber doch deutlich ein Knacken vernehmen. Einfach so, durch die Luft! Und das, obwohl keine leitende Verbindung zwischen Sender und Empfänger ist! Den wichtigen Herren von den Medien verschlägt's die Sprache, denn sie beginnen zu begreifen, daß sie gerade Zeuge einer ungeheuerlichen Umwälzung in der Menschheitsgeschichte geworden sind: Die drahtlose Telekommunikation ist geboren! Sie stürzen davon zu einer... nein, Telefonzellen gab es damals sicherlich noch nicht, denn die ersten Telefoneinrichtungen waren gerade erst installiert worden!

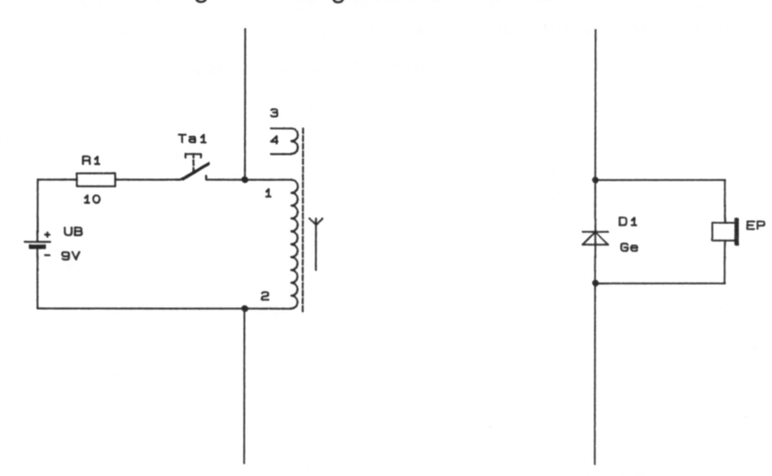


Bild 3. Das Schaltbild des Funkensenders und -empfängers.

Um der Wahrheit die Ehre zu geben: Heinrich Hertz benutzte damals einen großen Funkeninduktor – einen Hochspannungserzeuger – und einen geraden, waagerecht gespannten Draht, in dessen Mitte eine kleine Lücke war. Die Lücke war so bemessen, daß die Hochspannung des Induktors dort in knisternden Funken überschlug. In einiger Entfernung konnte er mit dem Mikroskop im Spalt eines weiteren, parallel dazu gespannten Drahtes ebenfalls kleine Fünkchen beobachten. Nur weil er genau wußte, wonach er suchte, war diese Entdeckung möglich!



Know-how: Von Schaltbildern und Modellen

Wenn ein Techniker einem anderen Techniker den Aufbau seines Versuches mitteilen will, zeichnet er nicht kunstvoll z.B. Lautsprecher und Batterie, wie wir es in Bild 4 versucht haben, sondern benutzt eine Art Stenogramm, eine Schaltzeichnung. Jedem Bauteil ist ein besonderes Symbol zugeordnet. Ein Symbol ist eine einfache Strichzeichnung, die das entsprechende Bauteil charakterisiert. In der Zeichnungssprache der Techniker würde unser Versuch also aussehen, wie in Bild 5 dargestellt. Die Drahtverbindungen zwischen den Bauteilen werden einfach als Striche gezeichnet. Es ist nicht nur einfacher, eine Schaltung auf diese Weise darzustellen. Der eigentliche Vorteil eines Schaltbildes liegt darin, daß die elektrische Funktionsweise besonders deutlich zu erkennen ist. Jedes Kind weiß natürlich, daß eine Batterie ein Lieferant von elektrischer Energie ist.

2. Wenn der Luftdruck schnell schwankt: Das Reich der Töne

Radio, das ist auch heute noch in erster Linie der Tonrundfunk. Was also liegt näher, als sich zuerst mit dem Wesen der Töne auseinanderzusetzen? Was passiert genau, wenn das Rock-Konzert aus Hamburg, übertragen über die Senderkette der ARD, in München die Fensterscheiben erzittern läßt?

2.1 Knack: ein Schlag gegen die Luft

Experimente

Wir katapultieren Salzkristalle!

Dazu legen wir unseren Lautsprecher flach auf den Tisch mit der Membrane nach oben und „würzen" sie mit einer Prise Salz. Nun nehmen wir die beiden Anschlüsse des Lautsprechers und tippen sie ganz kurz(!) an die beiden Pole der Batterie (Bild 4 links). Verbunden mit einem lauten Knack springen die Salzkristalle hoch in die Luft. Dabei können wir auch ganz deutlich die Bewegung der Membran beobachten. Sie bewegt sich in dem Moment, in dem wir die Drähte an die Pole der Batterie halten, sehr heftig. Es ist besonders wichtig, daß wir die Anschlüsse der Batterie nur kurz antippen, denn es fließt ein sehr großer Strom durch den Lautsprecher. Die Batterie wäre in ganz kurzer Zeit völlig erschöpft. So wie gegen die Salzkristalle schlägt die Membran auch gegen die Luft. Sie wird dabei kräftig zusammengedrückt, und die davon ausgehende Druckwelle trifft in unserem Ohr wiederum gegen das Trommelfell, ebenfalls eine Art Membran. Unser Gehirn wertet dann diese Druckwelle als einen Knack aus. Ein Knack oder Knall ist also nichts anderes als eine kurze Druckwelle in der Luft.

Stromrichtung: Knack hin, Knack her

Jetzt vertauschen wir die Anschlüsse des Lautsprechers oder drehen einfach die Batterie um und wiederholen den Versuch (Bild 4 rechts). In der einen Richtung springt die Membran zuerst nach oben und schleudert die Salzkristalle hoch, um beim Unterbrechen des Stromes wieder zurückzufallen. In der anderen Richtung taucht die Membran zunächst nach unten ab, die Salzkristalle folgen ihr, um dann beim Loslassen der Drähte wieder nach oben zu springen und sie dabei wegzuschleudern. Offenbar ist die Bewegungsrichtung der Membran abhängig von der Stromrichtung des durch den Lautsprecher fließenden Stromes.

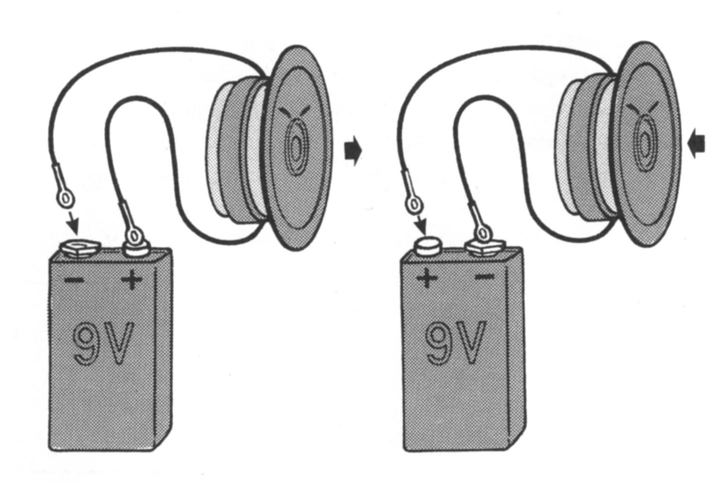


Bild 4. Salzkristalle, die auf die Membran des Lautsprechers gestreut sind, werden hoch in die Luft katapultiert. Je nach Stromrichtung (+ oder —) fliegen die Salzkristalle beim Antippen oder beim Loslassen der Anschlußdrähte. **Wichtig: Bei diesem Versuch wird die Batterie hart gebeutelt, deshalb nur ganz kurz die Batterieklemmen berühren.**

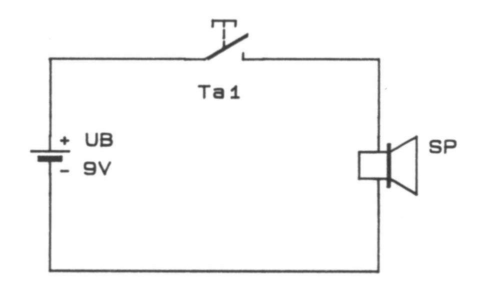


Bild 5. Der Knackversuch mit Taster(Ta1). Bitte nur ganz kurz auf den Taster drücken!

Wir sehen im Schaltbild weiterhin, daß sowohl die Batterie wie auch der Lautsprecher jeweils zwei Anschlüsse haben. Das muß doch Methode haben! Der elektrische Strom will immer wieder zum Ausgangspunkt seiner Reise zurückkehren. Er benötigt also einen Hin- und einen Rückweg. Auch wenn es im Schaltbild eckig zugeht, spricht man vom geschlossenen Stromkreis. Das Wasser, mit dem der elektrische Strom immer wieder verglichen wird, macht das im Grunde genauso: Aus einer Leitung (z.B. dem Wasserhahn) fließt es heraus, verrichtet seine Arbeit (z.B. Geschirrspülen), um dann durch die Abwasserleitung wieder das Weite zu suchen. Oha, werdet Ihr einwenden, es kann auch aus einem Gartenschlauch spritzen und einfach so versickern! Richtig! Und weil das so ist, und weil jedes Beispiel auf irgend eine Weise hinkt, werden wir die Beispiele auch gar nicht bis auf das letzte strapazieren. Wir werden natürlich immer wieder Modelle zur Erklärung bestimmter Sachverhalte benutzen – so machen es auch die Wissenschaftler – aber wir dürfen nie vergessen,

Taster unterbrechen den Stromkreis

Wir wollen unsere Schaltung nun ein wenig professioneller aufbauen: Von den Anschlüssen der Batterie ausgehend, verbinden wir mit Drahtbrücken den Lautsprecher über einen Taster (Bild 6). Ein Taster, jedem als Klingelknopf bekannt, ist ein Stromkreis-Unterbrecher und wird in der Schaltzeichnung wie eine Schranke gezeichnet. Es ist nicht nötig, beide Anschlüsse zu unterbrechen. Ein Taster genügt! Dies ist ein weiterer Unterschied zum Wasser: Man stelle sich vor, wir würden den Wasserkreislauf in der Abwasserleitung unterbrechen und den Hahn offen lassen! Um mit Heinz Erhard zu reden: Hei, das tät' spritzen! Wir können den Taster sowohl in die mit + (Plus) wie auch in die mit – (Minus) bezeichnete Leitung einbauen. Wir werden keinen Unterschied entdecken. Aber bitte nur ganz kurz auf den Taster drücken!

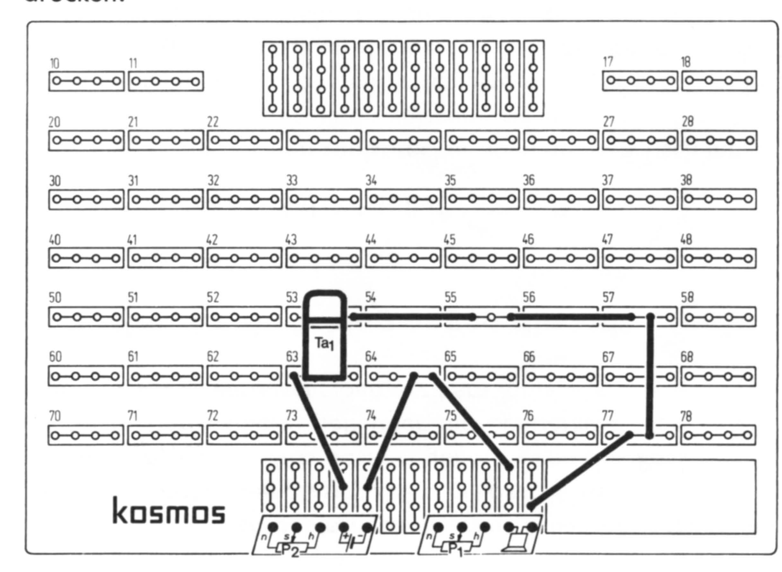


Bild 6. Aufbau zu Schaltung 5.

Knack – rein mechanisch erzeugt

Wenn wir den Taster mit dem Fingernagel schnippen lassen, erzeugt er ein ganz ähnliches Geräusch wie unser Lautsprecher-knack. Auch der Taster schlägt gegen die Luft und...(siehe oben). Und noch einen letzten Versuch sollten wir unternehmen, um uns von dem luftigen Charakter des Schalls zu überzeugen. Wir stellen auf dem Tisch eine Kerze auf, zünden sie (nicht die Wohnung) an und klatschen davor in die Hände. Der laute Knall bringt die Flamme ganz schön ins Zittern.

Laut und leise

In die einfache Schaltung fügen wir jetzt ein weiteres Bauteil ein: einen Widerstand (Bild 7).

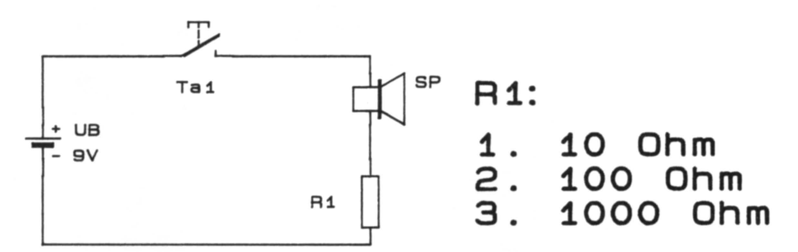


Bild 7. Ein Widerstand im Stromkreis macht das Knacken leiser.

Widerstände werden als längliches Kästchen gezeichnet. Dadurch sieht das Schaltbild „Widerstand" dem gleichnamigen Bauteil sehr ähnlich. Aber eigentlich ist der elektrische Widerstand gar kein Bauteil, sondern eine Materialeigenschaft! Bestimmte Materialien leiten eben den Strom besser als andere. Das werden wir als nächstes untersuchen. Jetzt wollen wir erst einmal sehen, wie das Bauteil im Stromkreis wirkt. Wir wählen zunächst einen Widerstand von 10 Ω (Ohm). Er ist mit den Farbringen braun-schwarz-schwarz gekennzeichnet.
Wenn wir jetzt den Taster drücken, ist das Knacken bereits merklich leiser. Wir wechseln jetzt den 10-Ω-Widerstand gegen einen solchen von 100 Ω (braun-schwarz-braun) aus: es knackt noch leiser. Bei einem 1000-Ω-Widerstand (braun-schwarz-rot) ist schließlich das Knacken kaum noch zu hören. Anstelle von 1000 Ω ist auf dem Bauteilepack die Bezeichnung 1 kΩ aufgedruckt. So wie 1000 Meter einfach als 1 Kilometer (1 km) bezeichnet werden, so steht auch beim Widerstand das k(ilo) für das Tausend-

daß es nur ein ähnlicher Vorgang ist, der uns hilft, die Phänomene aus der Welt des Unsichtbaren zu verstehen. Elektrischer Strom ist eben kein Wasser! Aber zur Ehrenrettung des „Wassermodells": Auch der Wasserkreislauf ist letztendlich geschlossen, nämlich über das von der Sonne verdunstete Wasser, die Regenfälle, die Quellen, über Bäche und Ströme zurück zum Meer!



Know-how: Farben kennzeichnen den Widerstand

Was zunächst wie ein Geheimcode wirkt, stellt sich beim genauen Hinsehen als geradezu einfach heraus: der Farbcode der Widerstände. Der goldene, manchmal auch der silberne Ring braucht uns zunächst nicht zu interessieren. Wir fangen mit der Zählweise grundsätzlich auf der jeweils anderen Seite an. Bei den drei bis jetzt von uns benutzten Widerständen hat sich nur die Anzahl der Nullen geändert; sie wird durch den dritten Ring (dem

fache von einem Ohm. Da ein Widerstand immer in der Maßeinheit Ohm angegeben wird, können wir den griechischen Buchstaben Ω (Omega) einfach weglassen. In unseren Schaltbildern ist deshalb nur die Erweiterung der Maßeinheit angegeben. 1k bedeutet eigentlich 1kΩ!

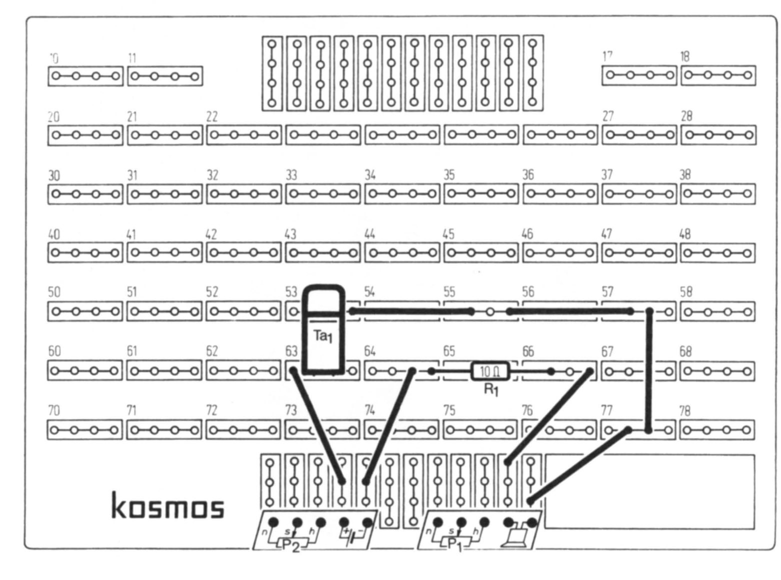


Bild 8. Aufbau zu Schaltung 7.

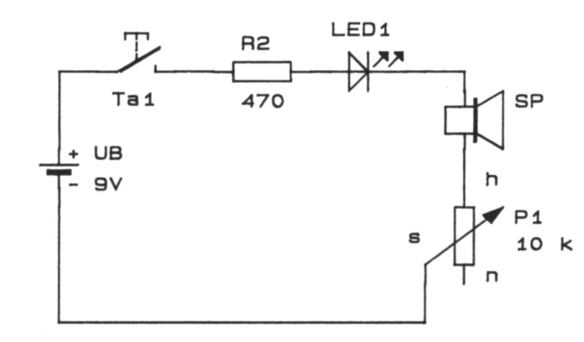


Bild 9. Mit dem Potentiometer P1 läßt sich die Lautstärke stufenlos einstellen. Auch die Helligkeit der Leuchtdiode LED1 zeigt die Stärke des durch sie hindurchfließenden Stromes an.

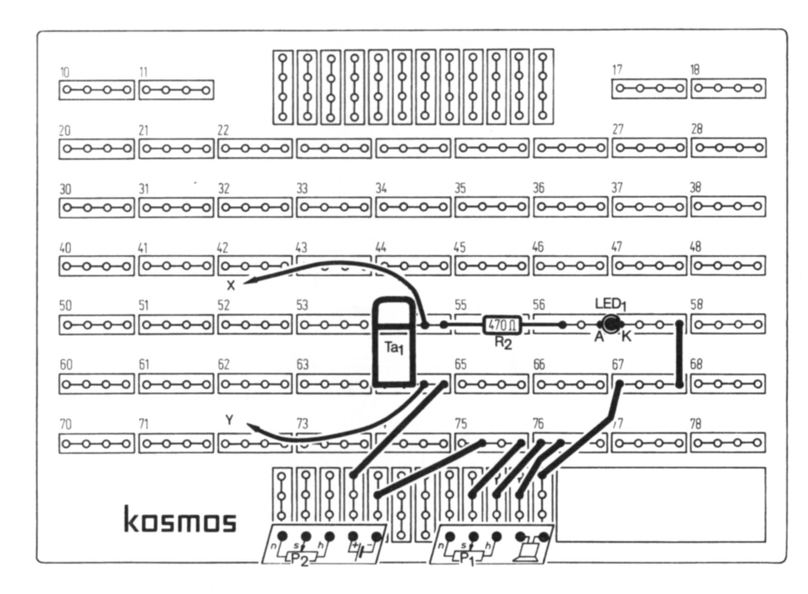


Bild 10. Aufbau zu Schaltung 9.

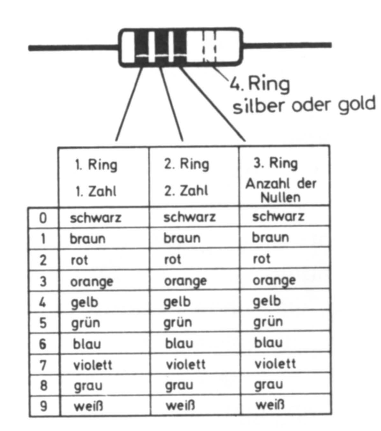
Stufenlos

Wir schalten das Potentiometer P1 zusätzlich zu einem Festwiderstand von 470 Ω und der Leuchtdiode LED1 in die Lautsprecherleitung (Bild 11). Dabei müssen wir darauf achten, daß das lange Bein der LED über R2 und Ta1 am Pluspol der Batterie angeschlossen ist! Der Knack läßt sich nun stufenlos von laut auf leise einstellen, und die Leuchtdiode zeigt dies durch helles bzw. schwaches Leuchten an. Der Festwiderstand ist notwendig, damit die LED keinen Schaden nimmt. **Bitte niemals eine Leuchtdiode ohne Schutzwiderstand anschließen!!!**

Leitend oder nichtleitend?

Wir können anstelle des Potis auch alltägliche Dinge unserer Umgebung auf ihren Widerstand untersuchen (Bild 12). Z.B. wird eine Bleistiftmine, eine Münze oder ein Stück Draht deutliche Knackser abgeben. Ein Stück Holz, ein Plastiklineal oder ein Suppenteller sind dagegen Nichtleiter und knacksen nicht.

letzten vor dem goldenen) codiert. Am Anfang stand immer ein brauner Ring (= 1) und ein schwarzer Ring (= 0). Beim 10-Ω-Widerstand benötigt man dazu keine weitere Null mehr, also folgt ein schwarzer Ring (= 0 Nullen). Der 100-Ω-Widerstand benötigt eine weitere Null, deshalb ist er mit einem braunen dritten Ring (= 1 Null) verziert. Für 1000 Ω schließlich sind 2 weitere Nullen notwendig, und das wird mit einem roten Ring (= 2 Nullen) ausgedrückt. Mit Hilfe der Farbtabelle können so also alle anderen Widerstände identifiziert werden.



	1. Ring 1. Zahl	2. Ring 2. Zahl	3. Ring Anzahl der Nullen
0	schwarz	schwarz	schwarz
1	braun	braun	braun
2	rot	rot	rot
3	orange	orange	orange
4	gelb	gelb	gelb
5	grün	grün	grün
6	blau	blau	blau
7	violett	violett	violett
8	grau	grau	grau
9	weiß	weiß	weiß

Bild 11. Farbcode-Tabelle für Widerstände.

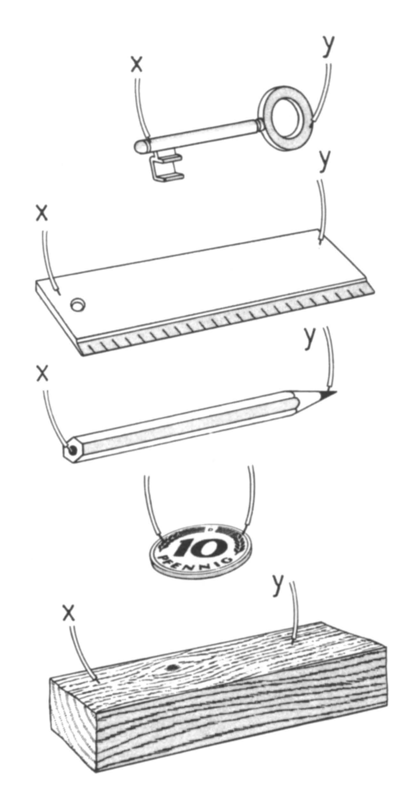


Bild 12. Leitfähigkeitsmessung verschiedener Gegenstände.

Der Transistor – ein elektrisch veränderbarer Widerstand!

Wir bauen die Schaltung nach Bild 14 auf. Anstelle des Potentiometers P1 – kurz Poti genannt – bauen wir jetzt den Transistor ein. Wir können noch so wild auf unserem Taster herumtasten, wir hören keinen Knack, und auch die Leuchtdiode blinkt nicht mehr. Ein Zeichen dafür, daß der Widerstand zwischen C und E sehr hoch ist. Die Sache ändert sich sofort, wenn wir die Steckfedern 33 und 34 mit unserem Finger überbrücken, also der Basis vom Pluspol der Batterie aus ein winzig kleines Strömchen über unseren „Fingerwiderstand" zuführen. Natürlich wissen wir nicht, welchen Widerstand unser Finger hat. Wir werden deshalb der Sache im nächsten Versuch mit knallharten Werten auf den Grund gehen.

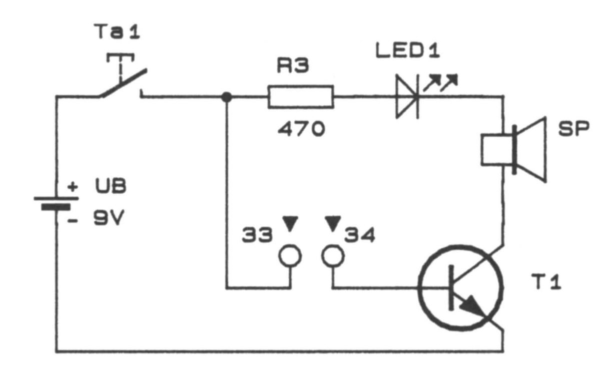


Bild 13. Der Druck auf den Taster erzeugt nur dann einen Knack, wenn der Transistor T 1 über den „Fingerwiderstand" mit Basisstrom versorgt wird. Dazu überbrücken wir die Steckfedern 33 und 34 mit unserer Fingerkuppe.

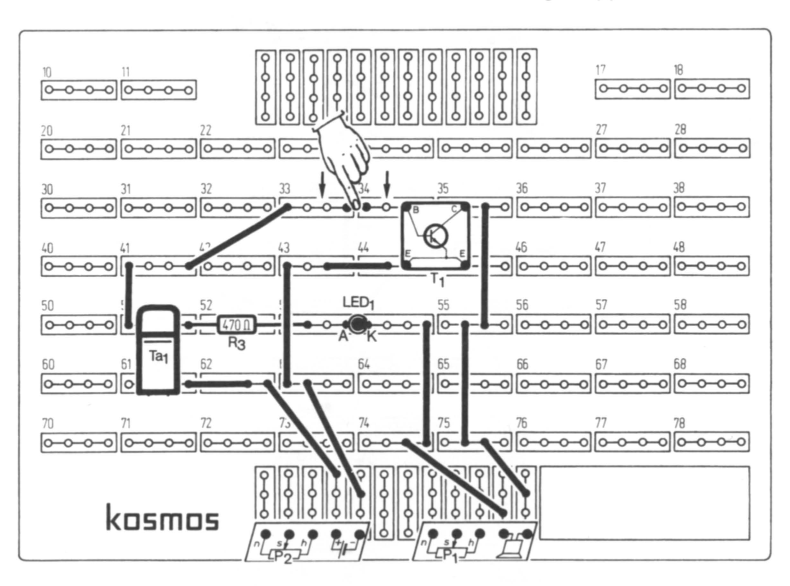


Bild 14. Aufbau zu Schaltung 13.

Auch für geheime Botschaften mit einem elektronikkundigen Klassenkameraden ist der Farbcode geeignet: Statt Zahlen werden nur noch Farben ausgetauscht.
Es bleibt noch die Frage zu klären, warum man nicht direkt den Widerstandswert auf den Widerstand aufdruckt. Ganz einfach: im eingebauten Zustand können die Farbringe von jeder Seite aus abgelesen werden. Die aufgedruckten Zahlen würden sich garantiert meist unter dem Bauteil befinden, wetten?



Know-how: Potentiometer: Ein Gummiwiderstand

Auf dem Schaltpult befinden sich unter den Drehknöpfen zwei einstellbare Widerstände. Der rechte (P1) hat einen Maximalwiderstand von 10000 Ω (= 10 kΩ). Dieser Widerstand liegt zwischen den Anschlüssen h und n. Der Schleifer s wandert drehknopfbetätigt zwischen diesen beiden Anschlüssen hin und her. Das heißt, daß am linken

Wir messen die Stromverstärkung

Da ohne Basisstrom der Taster im Arbeits-Stromkreis ohnehin keinen Sinn macht – der Transistor ist Unterbrechung genug –, können wir deshalb auch die Leuchtdiode fest an den Pluspol der Batterie anschließen. Wir brauchen also nur noch den Steuerstrom über die Basis zu tasten. Dazu schalten wir den größten Widerstand, den wir im Bauteilepack haben (den 680-kΩ-Widerstand), zusammen mit dem Taster in die Basisleitung (Bild 15). Wir hören ein leises Knacken, und auch die Leuchtdiode

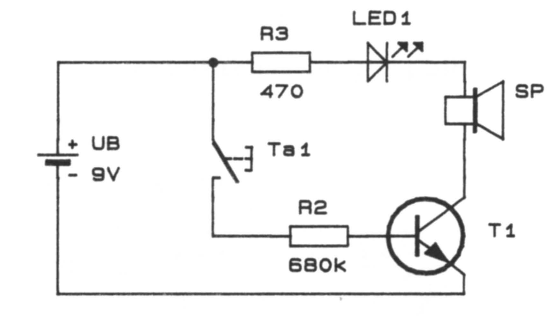


Bild 15. Es genügt, wenn wir lediglich den Steuerstrom über die Basis ein- und ausschalten. Der Transistor T 1 wirkt als elektronischer Schalter.

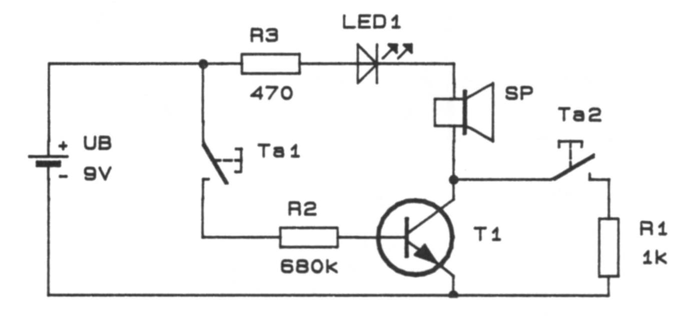


Bild 17. Messung der Stromverstärkung durch Vergleich: Taster Ta2 und der Widerstand R1 überbrücken den Transistor T 1. Der Knack ist etwa gleich laut, egal ob der kleine Steuerstrom über Ta1 oder der dicke Laststrom über Ta2 eingeschaltet wird.

brennt noch anständig hell. Wenn wir stattdessen mit dem zweiten Taster und dem 1-kΩ-Widerstand den Transistor zwischen Kollektor und Emitter überbrücken (Bild 17), hören wir ungefähr das Knacken in der gleichen Lautstärke. Das heißt: Wenn ein Strömchen über den 680-kΩ-Widerstand über die Basis-Emitter-Strecke des Transistors fließt, dann „imitiert" der Transistor einen Widerstand von ca. 1 kΩ zwischen Kollektor und Emitter. In den meisten Fällen wird sogar die Leuchtdiode noch ein bißchen heller brennen, wenn wir den Basisstrom tasten, d.h. der Strom in der Kollektorleitung muß mindestens 680 mal größer sein als der Strom in der Basisleitung. Wir haben damit auf sehr einfache Weise die Stromverstärkung unseres Transistors gemessen.

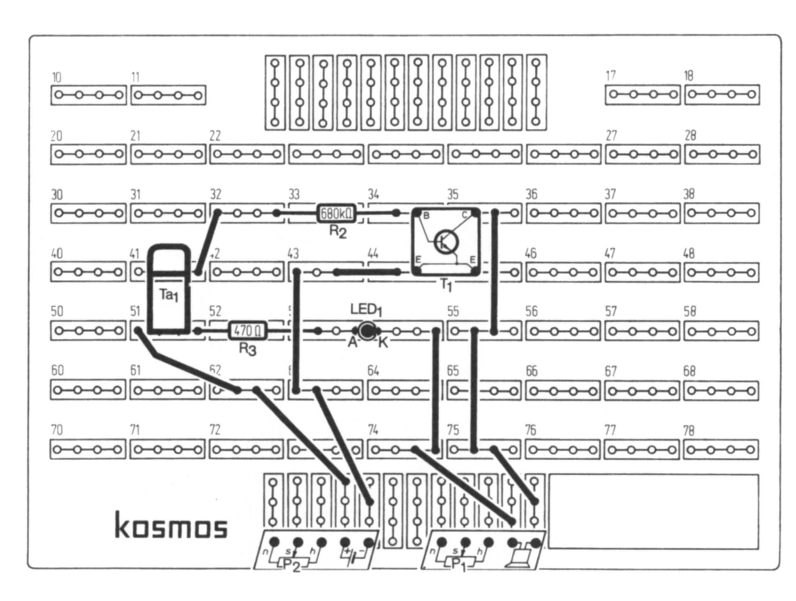


Bild 16. Aufbau zu Schaltung 15.

Anschlag der Schleifer s den Anschluß n berührt und somit zwischen s und h der volle Widerstand liegt, zwischen s und n dagegen gar keiner. Am rechten Anschlag ist es entsprechend andersherum. Zwischendrin lassen sich dann alle Zwischenwerte einstellen. In Mittenstellung (Knopf zeigt auf 3) liegen dann sowohl zwischen s und n wie auch zwischen s und h jeweils 5 kΩ.



Know-how: Die Spannung treibt den Strom durch den Widerstand

Auf der Batterie ist der Wert von 9 Volt (oder abgekürzt 9 V) aufgedruckt. Das ist der „Druck" unserer Spannungsquelle. Wie die Bilder 21 und 22 zeigen, schießt umso mehr Wasser aus den Spundlöchern der Gefäße, je mehr Wasserdruck darüberliegt. Wenn auch dieses Wassermodell wiederum nicht den genauen Sachverhalt erklärt (wie dies eben bei Modellen so ist!), so ist doch die Behauptung richtig, daß durch einen elektrischen Wider-

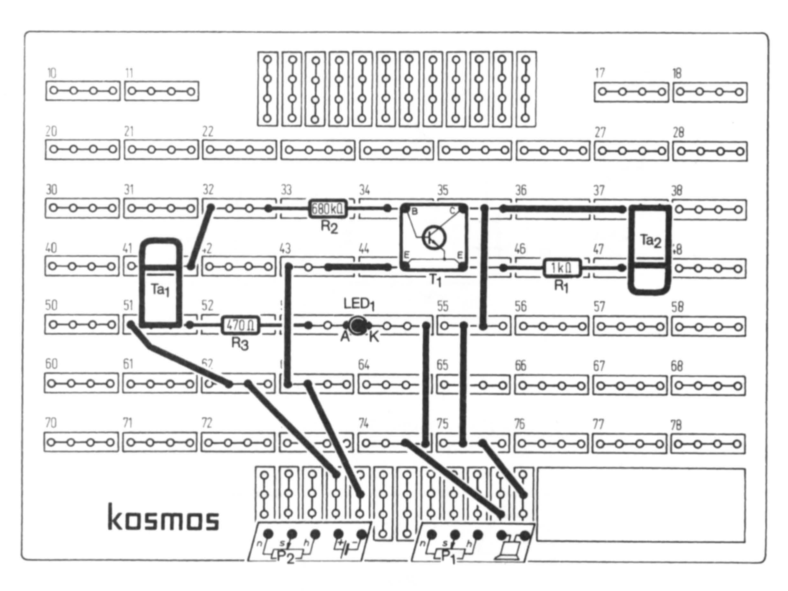


Bild 18. Aufbau zu Schaltung 17.

Dioden sind Einbahnstraßen für Elektronen

Wenn wir die Leuchtdiode herausziehen und umgekehrt in den Stromkreis einschalten, funktioniert nichts mehr. Eine Diode läßt den Strom nur in einer Richtung durch (Bild 19).

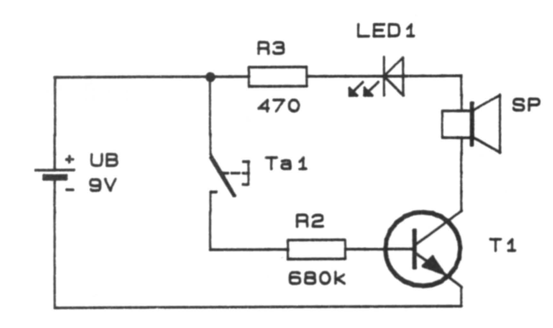


Bild 19. Dioden haben Richtwirkung. Wenn die Diode verkehrt herum im Stromkreis steckt, fließt kein Strom.

Knacken durch Stromänderung

Wer genau aufpaßt, wird feststellen, daß das Knacken im Lautsprecher nur beim Ein- bzw. Ausschalten des Stromes erfolgt. Solange die Leuchtdiode brennt, hören wir im Lautsprecher nichts. Ein Geräusch entsteht nur durch die Bewegung der Membran. Wenn der Strom gleichmäßig fließt, ist auch die Membran in Ruhe. Der Strom durch Diode und Lautsprecher hat also den Verlauf wie in Bild 20 gezeigt.

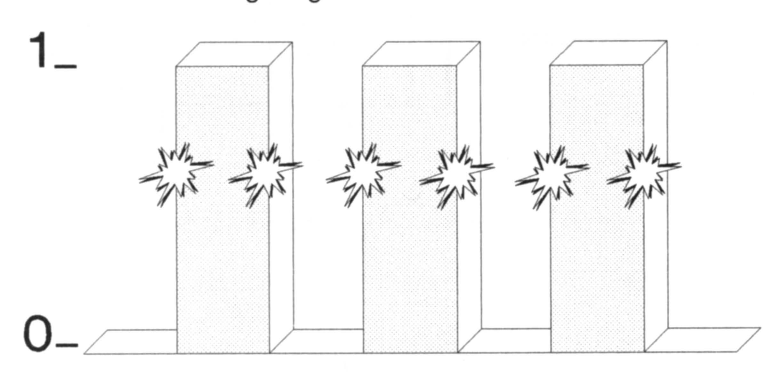


Bild 20. Schall entsteht durch Bewegung: Es knackt nur beim Ein- oder Ausschalten des Stromes. Die Leuchtdiode brennt dagegen nur, solange der Strom eingeschaltet ist. Wenn ein Strom fortwährend ein- und ausgeschaltet wird, spricht man von einer Rechteckfunktion.

Techniker nennen diesen Stromverlauf eine Rechteckfunktion. Es knackt nur an den senkrechten „Flanken", also bei plötzlichen Änderungen des Stromes. Zum Knacken ist der gleichmäßige Stromfluß völlig überflüssig. Die Leuchtdiode leuchtet dagegen nur, solange der Strom fließt, also auf den ebenen „Gipfeln".

Kondensator – Sperre für Gleichstrom

Wir schalten einen Kondensator in den Stromkreis ein (Bild 23). Man sagt, der Kondensator liegt in Reihe zu Leuchtdiode und Lautsprecher. Wir wählen einen Elektrolytkondensator, im Laborjargon kurz Elko genannt, von 10 μF (zehn Mikrofarad). Es ist sehr wichtig, darauf zu achten, daß der mit – (Minus) bezeichnete Anschluß auf den Minuspol der Batterie zeigt! Nach dem

stand umso mehr Strom fließt, je mehr Spannung an ihn angelegt wird; „je mehr Volt verwendet werden". Spannung herrscht in einem Stromkreis immer zwischen zwei Punkten; sie entspricht dem „Antrieb" des Stromkreises.

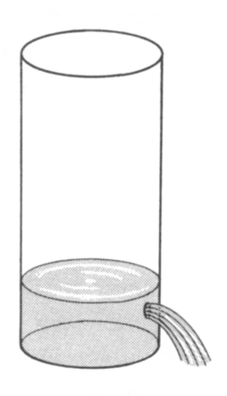


Bild 21. Geringe Spannung – geringer Strom.

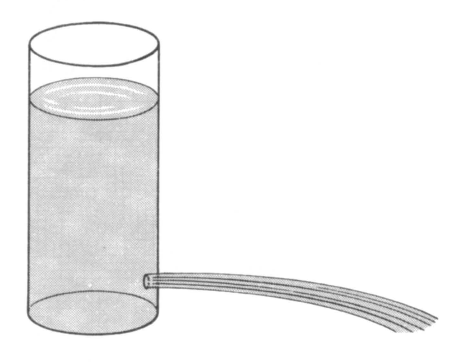


Bild 22. Hohe Spannung – hoher Strom.

Schaltbild des Kondensators – zwei sich gegenüberstehende Platten ohne leitende Verbindung – würden wir erwarten, daß durch die Lücke im Stromkreis kein Strom fließt. Dies ist auch völlig richtig so. Aber **in** den Kondensator kann Strom hineinfließen. Wenn wir auf den Taster Ta1 drücken, leuchtet die LED nur kurz auf, und im Lautsprecher ist ein deutliches Knacken zu vernehmen. Dann können wir den Taster aber beliebig lange festhalten oder mehrfach antippen, die Leuchtdiode rührt sich nicht mehr.

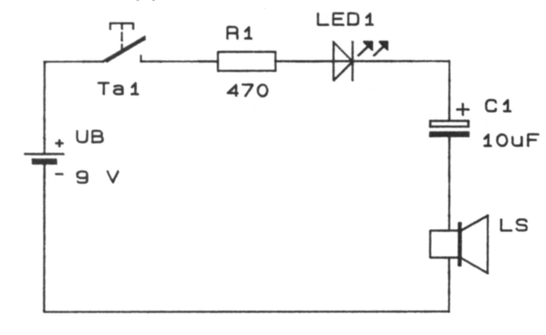


Bild 23. Ein Kondensator läßt keinen Gleichstrom durch. Der Strom fließt nur so lange, bis der Kondensator aufgeladen ist.

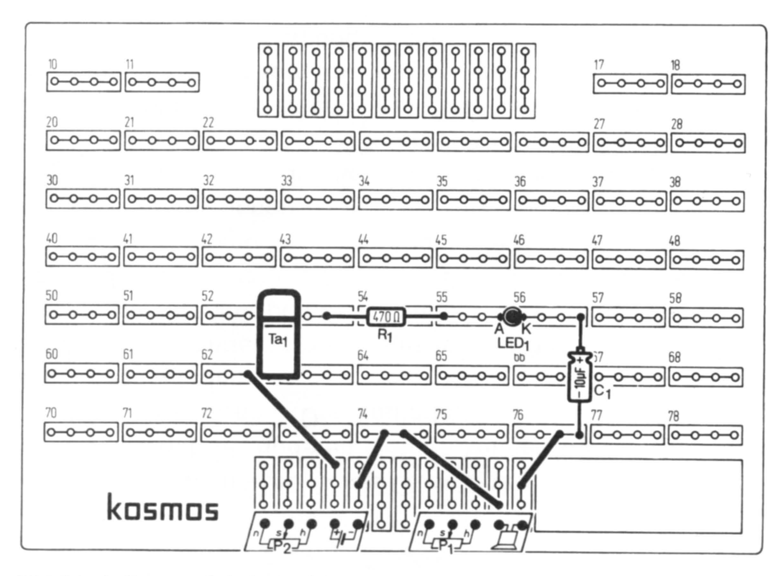


Bild 24. Aufbau zu Schaltung 23.

Wir erzeugen Wechselstrom

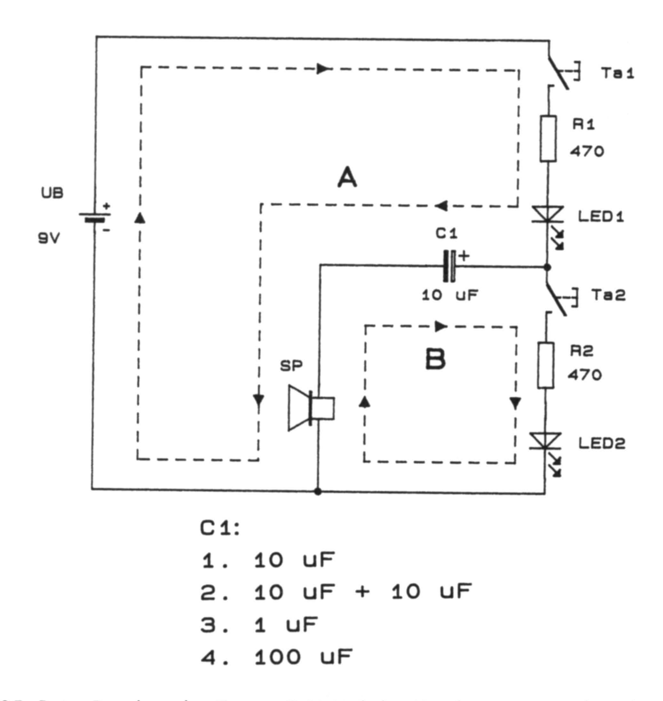


Bild 25. Beim Drücken des Tasters Ta1 wird der Kondensator C1 über den Weg A aufgeladen. B zeigt den Entladestromkreis über Ta2. Die beiden Ströme durchfließen den Lautsprecher jeweils in entgegengesetzter Richtung: Wechselstrom.

Bild 25 (Aufbau 26) zeigt eine ganz raffinierte Lade-Entladeschaltung. Wenn Taster Ta1 gedrückt wird, fließt der Ladestrom vom Pluspol der Batterie über Ta1, den Widerstand R1, die Leuchtdiode LED1 auf die Plusplatte des Kondensators. Gleichzeitig – auf der anderen Seite des Kondensators – verschwinden die Elektronen über den Lautsprecher zum Minuspol der Batterie. Wir wissen, daß sich die Elektronen in Wirklichkeit vom Minuspol zum Pluspol der Batterie bewegen. Leider wurde die Stromrichtung vor Urzeiten aber nun mal von Plus nach Minus festgelegt, und wir wollen uns daran halten. Nachdem der Kondensator aufgeladen ist, hört der Ladestrom von selbst auf zu fließen, und LED1 verlöscht. Das große Ungleichgewicht auf den



Know-how: Transistor – Ein Strömchen kommandiert den Strom

Der verständliche Wunschtraum so vieler Winzlinge, endlich einmal gegenüber den Starken das Sagen zu haben, wurde 1948 für den elektrischen Strom Wirklichkeit: Die Herren John Bardeen, Walter Brattain und William Shockley erfanden den Transistor. Ein dicker Laststrom folgt haargenau dem „Kommando"(den Schwankungen) eines klitzekleinen Steuerstromes. Das ist das Grundprinzip, nach dem jeder Transistor funktioniert. Wir nehmen einen der npn-Transistoren zur Hand und betrachten das darauf aufgemalte Schaltbild. Das Modul hat vier Anschlüsse, der Transistor selbst hat nur drei. Wir erkennen, daß der mit E bezeichnete Anschluß doppelt vorhanden ist. E steht für Emitter. Der dicke Laststrom fließt von C (Kollektor) zum Emitter. Der Steuerstrom fließt von B (Basis) zum Emitter. Je nach der Größe des Basis-Emitter-Stromes ändert sich auch der Wider-

Kondensatorplatten – höllisches Gedränge auf der einen, gähnende Leere auf der anderen Platte – können wir mit Hilfe von Taster Ta2 ausgleichen. Der Endladestromkreis kann wie folgt beschrieben werden:
Plusplatte des Kondensators, Taster Ta2, Widerstand R2, LED2, Lautsprecher SP, Minusplatte des Kondensators C1. Man sieht, daß der Kondensator jetzt die Rolle der Batterie übernommen hat. Der Lautsprecher knackt genauso laut wie beim Aufladen. Und auch LED2 brennt genauso lange (so kurz) wie beim Aufladevorgang. Alles, was wir in den Kondensator hineingepumpt haben, gibt er uns wieder zurück. Wie an den gestrichelten Linien im Schaltbild (Bild 25) zu erkennen ist, fließt der Strom beim Entladen entgegengesetzt zum Ladevorgang durch den Lautsprecher. Ein Strom, der seine Richtung ändert, ist ein Wechselstrom.

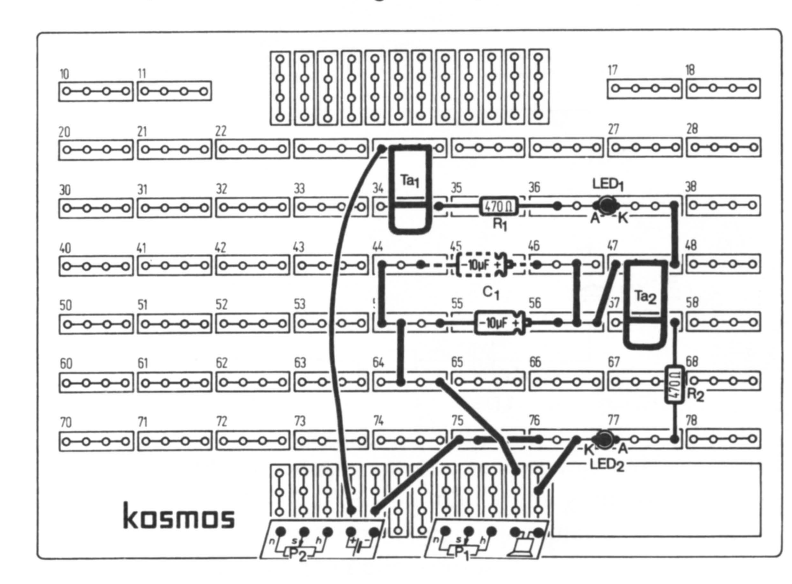


Bild 26. Aufbau zu Schaltung 25.

Parallelschalten bringt mehr Kapazität

Wir können die Kapazität eines Kondensators dadurch vergrößern, daß wir seine Platten vergrößern oder, elektrisch einfacher, indem wir einen weiteren Kondensator parallel schalten. Zu C1 stecken wir einen weiteren 10-μF-Kondensator ein. Sowohl beim Aufladen wie beim Entladen ist jetzt die Leuchtdauer der LED verdoppelt. Nachdem wir den Wechselblinker ein paarmal betätigt und uns davon überzeugt haben, versuchen wir das gleiche jetzt mit einem 1-μF-Kondensator. Jetzt blitzen die LED nur kurz auf. Kein Wunder: 1 μF ist ja auch nur ein Zehntel von 10 μF. Als nächstes versuchen wir das gleiche Spiel mit dem größten Kondensator in unserem Bauteilepack: 100 μF. Deutlich erkennen wir das schnelle Aufblitzen der Dioden mit langsamerem Dunkelwerden. Der Strom in den Kondensator hinein bzw. aus ihm heraus ist also nicht zu jedem Zeitpunkt gleich stark, sondern am stärksten im Einschaltmoment der Taster, um dann langsam abzufallen (Bilder 27 und 30).

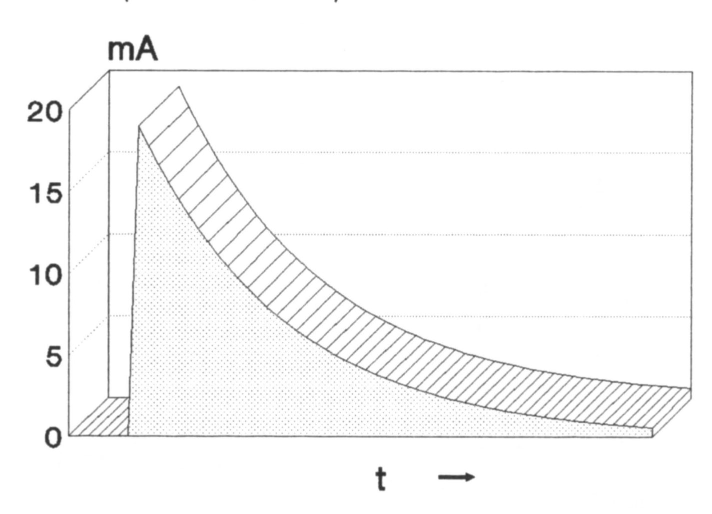


Bild 27. Der Ladestrom eines Kondensators: Ein leerer Kondensator wirkt wie ein Kurzschluß, entsprechend hoch ist der Strom im Einschaltmoment. Je voller der Kondensator wird, desto geringer wird der Strom. Deshalb brennt die Leuchtdiode LED1 im Einschaltmoment am hellsten, um dann langsam dunkler zu werden.

stand zwischen C und E und damit der Kollektor-Emitter-Strom. Auf auswärts (lateinisch) heißt Widerstand Resistor. Und weil sein (Übergangs-) Widerstand veränderbar ist: Trans-Resistor oder als allgemein gebräuchliches Kunstwort Transistor. Unser Wasserschleusenmodell (Bilder 28 und 29) hilft uns, die Funktionsweise des Transistors zu verstehen.

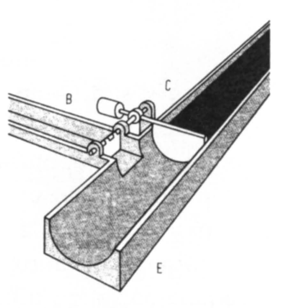


Bild 28. So funktioniert ein Transistor: Ohne Steuerstrom (Basiskanal leer) wird von der großen Klappe der Stromfluß durch den Kollektor-Emitter-Kanal verhindert.

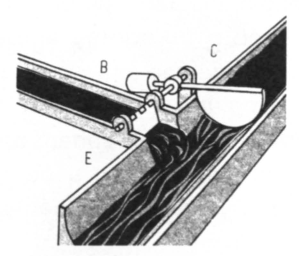


Bild 29. Sobald ein Steuerstrom durch den Basiskanal die kleine Klappe aufdrückt, fließt durch die sich nun öffnende große Klappe ein starker Kollektor-Emitter-Strom.

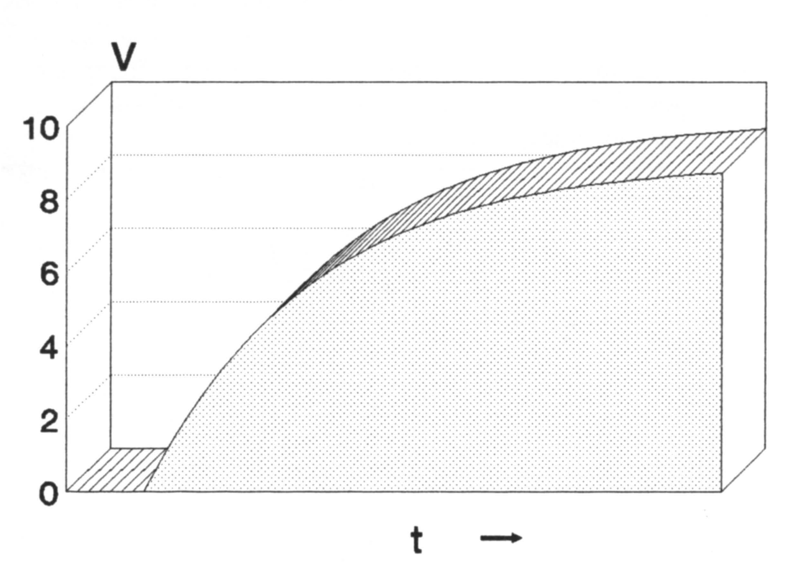


Bild 30. Die Spannung am Kondensator wächst mit zunehmender Ladedauer.

Umladen mit Pausen

Wir können den Kondensator auch in Stufen auf- bzw. entladen, indem wir die Tasten mehrfach in Abständen nur kurz drücken. Wenn der Kondensator nicht vollständig aufgeladen wird, gibt er auch keine volle Ladung mehr ab (Bilder 31 und 32).
Aufgrund des Kondensators ist der Strom durch den Lautsprecher jetzt natürlich keine Rechteckfunktion mehr, sondern er springt beim Betätigen der Taster zunächst auf den vollen Wert, um dann langsam abzufallen. Wenn wir den Kondensator klein genug wählen, bleiben von dem ursprünglichen Rechteckstrom nur noch spitze Nadeln übrig. Der Kondensator sperrt also den für das Leuchten der LED wichtigen Gleichstrom. Die „knackerzeugenden" Flanken – der Wechselstromanteil – werden ungehindert durchgelassen.

Wir entwickeln einen Multivibrator

Da uns das Drücken der Taster langsam zu anstrengend wird, wird es Zeit, darüber nachzudenken, wie wir es automatisieren können. Dazu benutzen wir die Transistoren.

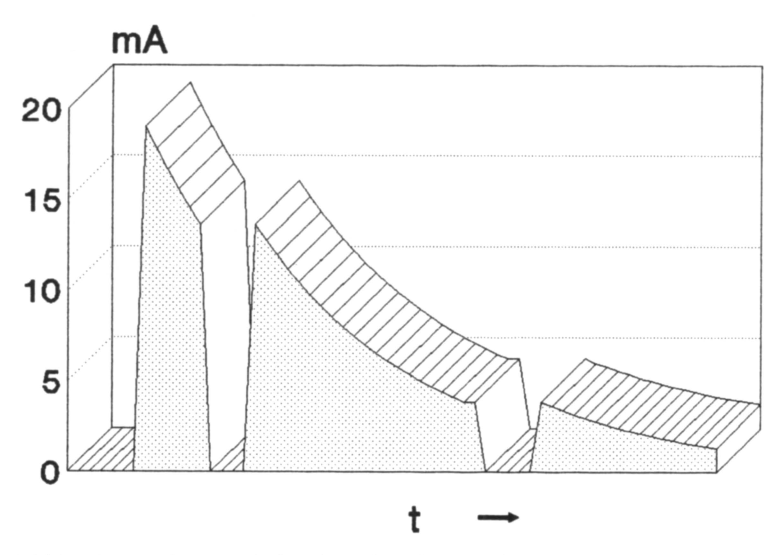


Bild 31. Ein Kondensator lädt sich auch auf, wenn der Ladestrom immer wieder kurzzeitig unterbrochen wird.

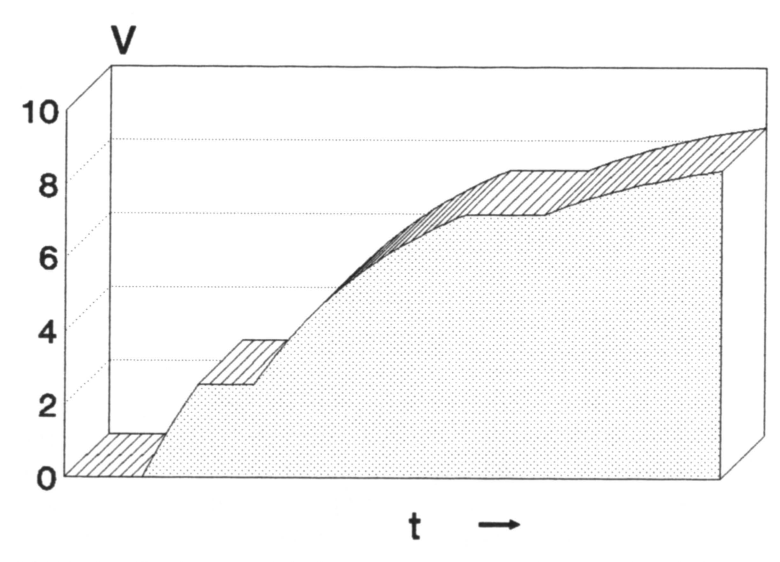


Bild 32. Der Kondensator als Ladungssammler: Das Aufladen (und auch das Entladen) muß nicht in einem Zug geschehen. Der Kondensator „merkt sich" die zuletzt erreichte Spannung und macht nach einer Pause mit genau demselben Wert weiter.

Wir sehen den dicken Kanal von C nach E und sehen den kleinen Steuerkanal von B nach E. Solange sich an der Basis nichts tut, ist die Schleuse durch die große Klappe an C gesperrt. Sobald aber ein kleines Strömchen zur Basis hereinfließt und gegen die kleine Klappe drückt, wird auch die große Klappe geöffnet, und der mächtige Kollektor-Emitter-Strom kann nun fließen. Kleine Ursache - große Wirkung! Wir verlassen aber sofort das Wassermodell – der feine Mann sagt Analogon dazu – und widmen uns wieder der Elektronik.

Know-how: Stromverstärkung

Der Transistor macht den Strom nicht einfach größer, wie man das bei dem Ausdruck „Verstärkung" vermuten könnte, sondern ein kleiner Strom steuert einen größeren Strom, der der Batterie entnommen wird. Der Steuerstrom läßt einfach den Batteriestrom für sich arbeiten. Das Verhältnis dieser

Ein Multivibrator ist eine Art automatische Knackmaschine. Solche Rechteckgeneratoren sind in Studios und Reparaturwerkstätten für Prüf- und Meßzwecke im Einsatz.
Wir wollen aber schrittweise vorgehen und ersetzen zunächst einen mechanischen Schalter (Taster) durch einen elektronischen Schalter.

Experimente

Immer im Widerspruch: die Nein-Schaltung

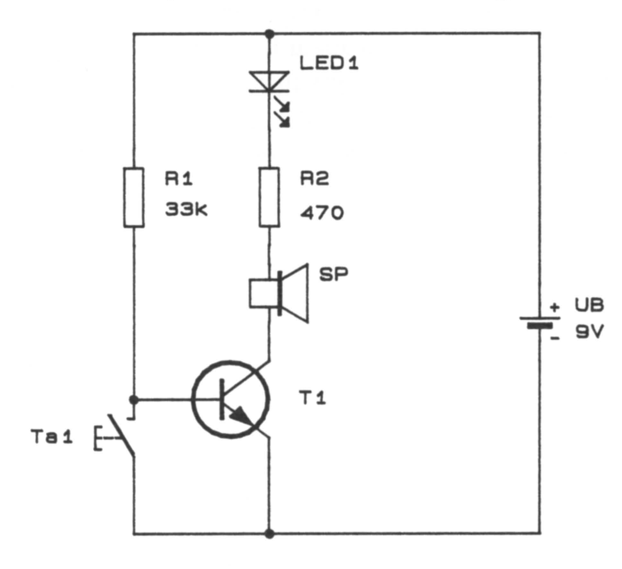
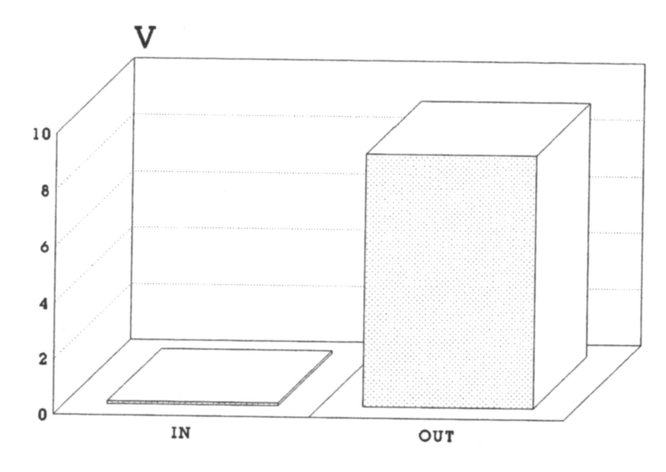


Bild 33. Die Nein-Schaltung: Die Leuchtdiode LED1 geht beim Betätigen des Tasters Ta1 aus, da Basis und Emitter kurzgeschlossen werden.

Wenn wir die Schaltung (Bild 35) aufgebaut haben, leuchtet die LED sofort hell auf. Ganz klare Sache, der Transistor erhält seinen Steuerstrom über R1. Infolgedessen fließt auch Kollektorstrom. Jetzt machen wir es umgekehrt, wie bei unseren früheren Transistorversuchen. Der Basisanschluß des Transistors – in Zukunft einfach kurz und schnodderig Basis genannt – wird mit dem Taster Ta1 einfach kurzgeschlossen. Dadurch wird die Basis auf das elektrische Niveau des Emitters heruntergezogen. Keine Spannung zwischen Basis und Emitter, kein Strom durch die Basis, damit auch kein Strom durch Leuchtdiode und Kollektor. So einfach ist das! Die LED geht also jetzt beim Tasten (beim Einschalten!) aus! Üblicherweise wird diese Schaltung als Not- (englisch für Nicht) Schaltung oder als Inverter (lateinisch für Umkehrer) bezeichnet. (Know-how S. 31)



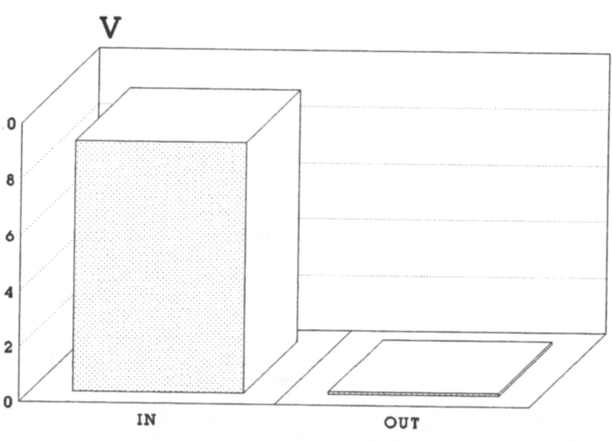


Bild 34. Der Ausgang (OUT: der Kollektor) macht immer das Gegenteil des Zustandes am Eingang (IN: die Basis).

beiden Ströme – also um wievielmal der Kollektorstrom stärker ist als der Basisstrom – ist die Stromverstärkung des Transistors. Mathematiker formulieren diesen langen Satz auf genial einfache und klare Weise:

$$\text{Stromverstärkung } B = \frac{I_C}{I_B} = \frac{R_B}{R_C}$$

Um genau zu sein, müßten wir noch den Vorwiderstand der Leuchtdiode R3 mitberücksichtigen. Dies wollen wir der Einfachheit halber einmal vernachlässigen.

Know-how: Der Pfeil weist den Weg!

Die „richtungsweisende" Wirkung der Dioden ist im Schaltzeichen durch das Symbol des Pfeiles dargestellt. Wir können uns die Funktionsweise wieder mit Hilfe eines Wassermodells erklären (Bild 38). Die Schleusenklappe hat einen Anschlag und kann sich infolgedessen nur in einer Richtung öffnen. Die Schleuse, wie auch

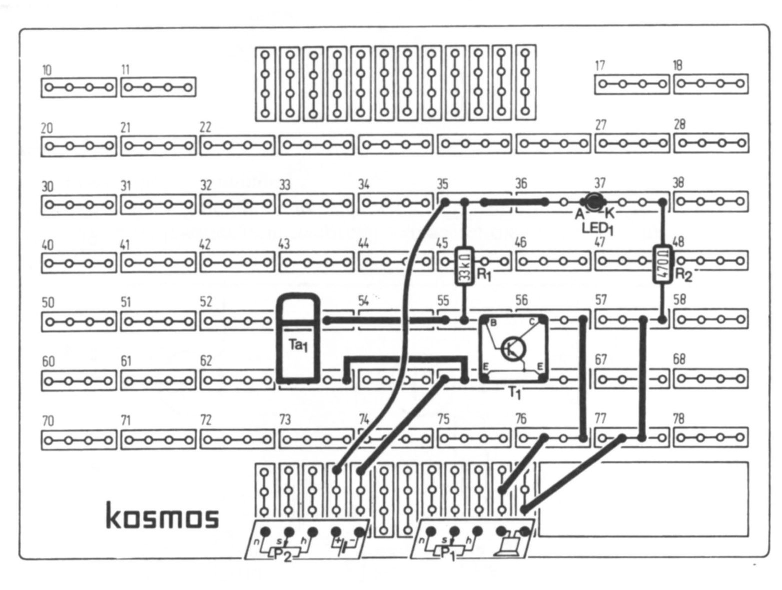


Bild 35. Aufbau zu Schaltung 33.

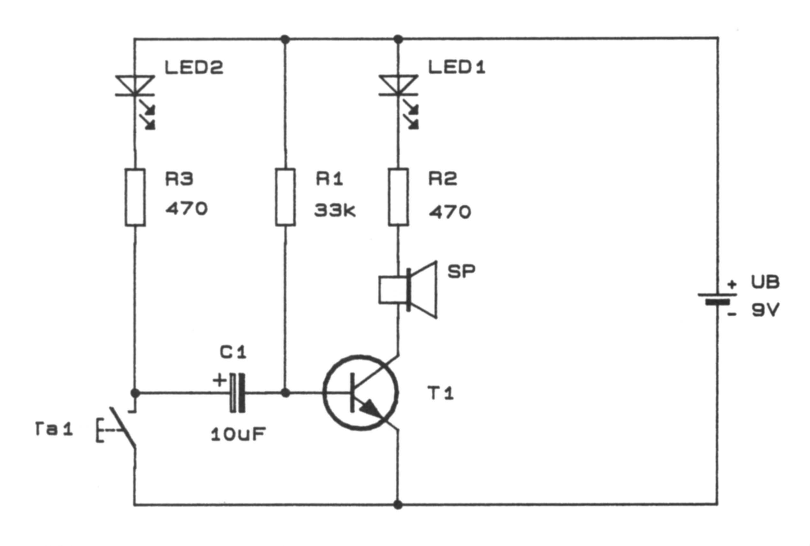


Bild 36. Der Taster Ta1 ist „dynamisch" an die Basis angeschlossen. Dadurch kann sich das Betätigen von Ta1 nur während der Entladezeit von C1 auswirken.

Nur anschubsen, nicht festhalten

Jetzt schließen wir den Taster nicht direkt an die Basis, sondern über den 10-μF-Kondensator C1 an (Bild 37). Damit C1 sich aufladen kann, fügen wir noch den 470-Ω-Widerstand (R3) und LED2 hinzu. Wenn wir jetzt Ta1 drücken, geht LED1 nur ganz kurz aus. Gerade so lange wie C1 braucht, um entladen zu werden. Für diese kurze Zeit wirkt der Kondensator nämlich wie ein Kurzschluß und „legt" die Basis über Ta1 wieder auf Emitterpotential. Sobald C1 „leer" ist, hat der Basiswiderstand wieder das Sagen und kann seinen Steuerstrom ungestört durch die Basis fließen lassen. Halbautomatisch funktioniert unsere Knackmaschine schon. Jetzt wird es Zeit, auch noch den letzten Taster durch einen Transistor zu ersetzen.

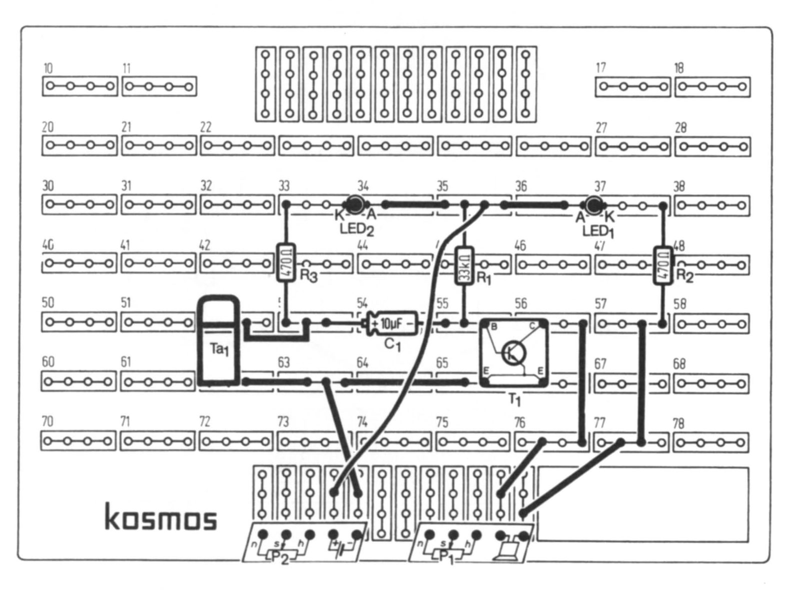


Bild 37. Aufbau zu Schaltung 36.

öffnen. Die Schleuse, wie auch die Diode, hat demnach eine Durchlaß- und eine Sperrichtung. Wir setzen die Diode wieder richtig herum in den Stromkreis ein, d.h. der Strom kann vom Pluspol der Batterie kommend in Pfeilrichtung durch die Leuchtdiode fließen. Das Transistorsymbol hat ebenfalls einen Pfeil am Emitter. Auch hier muß der Strom in Pfeilrichtung fließen.

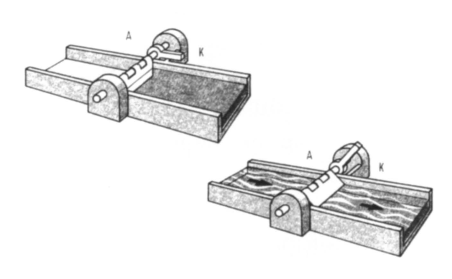


Bild 38. Dioden funktionieren wie Rückschlagventile: Sie lassen den Strom nur in einer Richtung passieren.

Know-how: Kondensatoren

Ein Kondensator ist eine Art Energiespeicher. Als Schaltsymbol wird er durch zwei sich gegenüberstehende

Zweimal Nein ist gleich Ja!

Zunächst benötigen wir den Taster aber noch, um den Transistor T2 anzusteuern (Bild 40). Wieder beobachten wir das bekannte Umdrehen der Funktionsweise, d.h. LED2 leuchtet nun dauernd und geht beim Betätigen von Taster Ta1 aus. Beim Loslassen verlischt auch LED1 kurz. Jetzt müssen wir nur noch einen Trick finden, um T2 automatisch, gesteuert von T 1, schalten zu lassen. Der Transistor T2 könnte gut die Funktion des Tasters übernehmen, wir können uns den durchgesteuerten Transistor wie einen geschlossenen Taster zwischen dem Pluspol von C1 und Minus vorstellen. Den gleichen Trick lassen wir jetzt von T 1 ausführen.

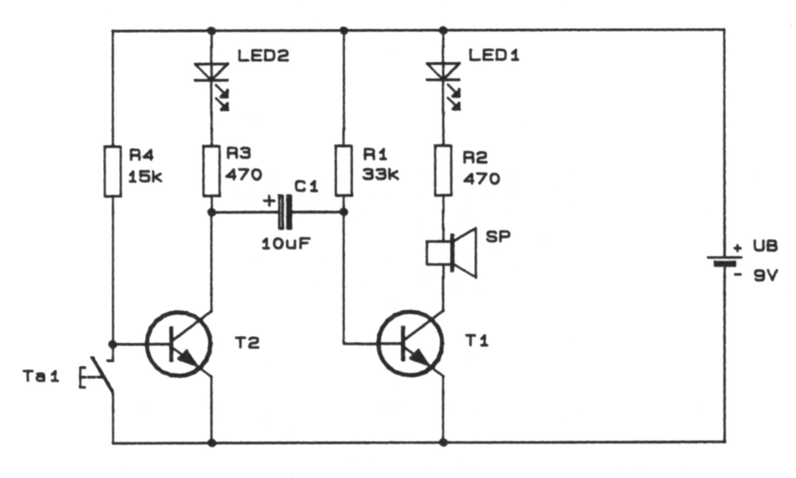


Bild 39. Zwei Inverter hintereinander wirken so, als ob gar kein Inverter vorhanden wäre: Beim Betätigen von Ta1 leuchtet LED1 auf. Doppelte Verneinung bedeutet bekanntlich Zustimmung.

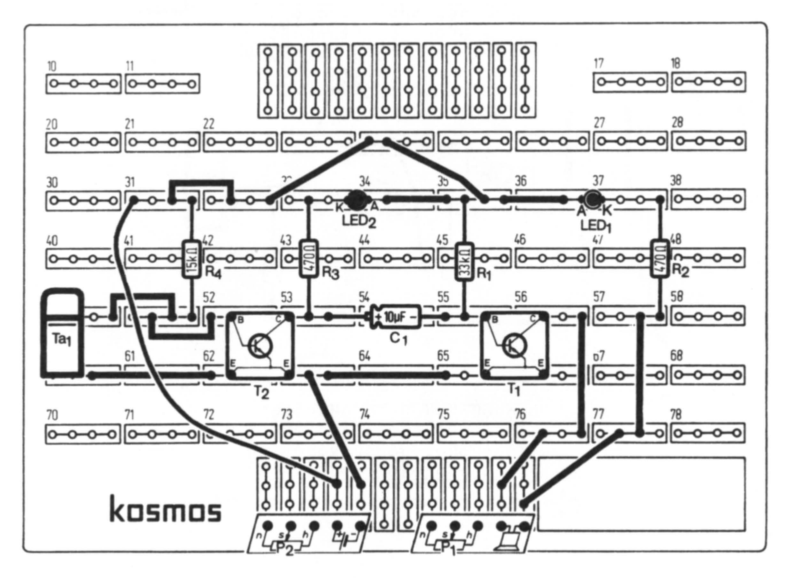


Bild 40. Aufbau zu Schaltung 39.

Einer wirft den anderen um!

Wir fügen den Kondensator C2 hinzu (Bild 42), und dadurch entladen die Transistoren gegenseitig die Kondensatoren des jeweils anderen nach dem Motto: Wie Du mir, so ich Dir. Wir haben es geschafft! Die Leuchtdioden blinken abwechselnd, da jeder Transistor immer genau das Gegenteil des anderen macht. Das Knacken erfolgt jetzt vollautomatisch!

Platten dargestellt. Die Verwandschaft zum Schaltsymbol der Batterie ist nicht zufällig, sondern beabsichtigt. So wie die Batterie ist auch der Kondensator ein Energiespeicher. Auf der einen Kondensatorplatte sammeln sich massenhaft Elektronen, während sie von der anderen abgezogen werden. Dieses Ungleichgewicht von Elektronen nennt man ja bekanntlich elektrische Spannung. Der Kondensator hat jetzt Elektronen gespeichert. Das Spiel beginnt von neuem, nachdem wir mit einer langen Drahtbrücke den Kondensator kurzgeschlossen, d.h. entladen haben. Nicht jeder Kondensator kann gleichviel Elektronen aufnehmen. Je größer die Platten eines Kondensators, desto mehr Elektronen finden darauf Platz. Das Fassungsvermögen von Kondensatoren nennt man Kapazität. Um auch Kondensatoren mit großer Kapazität in kleine Radios einbauen zu können, rollt man die Platten einfach zusammen. Damit zwischen ihnen kein Kurzschluß entsteht, wickelt man eine isolierende Folie (z.B. aus Kunststoff) zwischen die Metallplatten ein. Der Isolierstoff

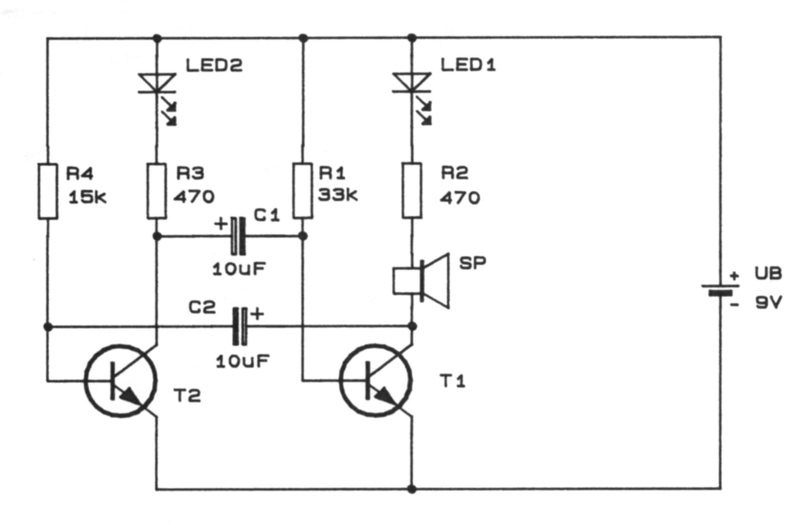


Bild 41. Multivibrator: Zwei zu einem Ring zusammengeschaltete Inverter blinken selbsttätig.

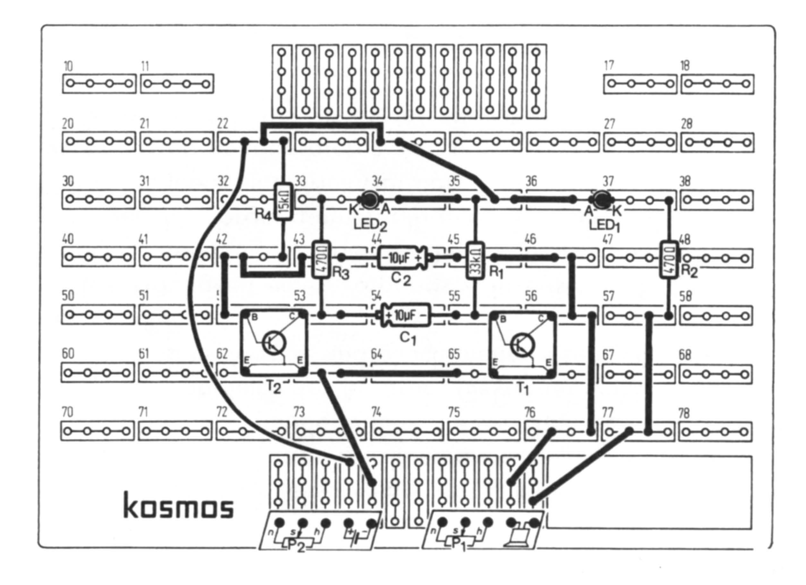
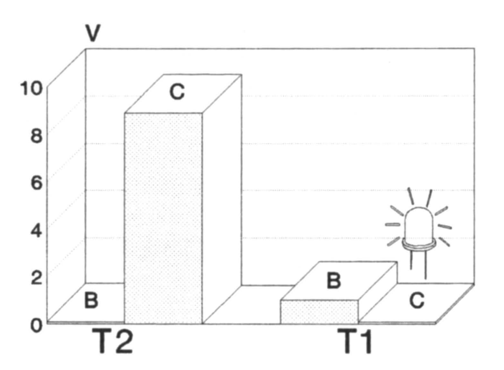


Bild 42. Aufbau zu Schaltung 41.



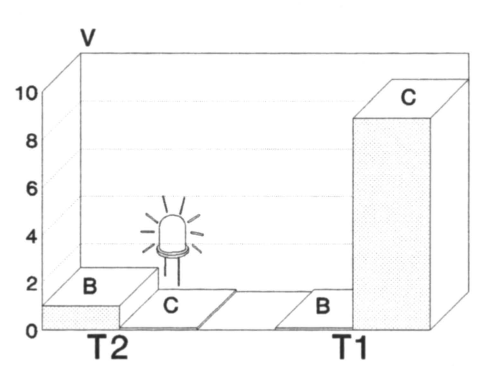


Bild 43. Die Potentiale des Multivibrators: Hohes Basispotential erzeugt ein niedriges Kollektorpotential und läßt die LED aufleuchten. Dabei wechseln sich die beiden Transistoren immer ab.

Langsam und schnell blinken und knacken

Interessant wird das Spiel, wenn wir abwechselnd einen 10-μF-Kondensator gegen einen von 100 μF austauschen. Dadurch wird jeweils die Leuchtdauer der einen bzw. der anderen Leuchtdiode verlängert.

Frequenz: Knacken wird zum Ton

Wir setzen jetzt für C1 den 1- μF-Kondensator ein. Das Blinken und Knacken erfolgt sofort wesentlich schneller. Es wird noch-

zwischen zwei Kondensatorplatten heißt Dielektrikum, sprich Di-Elektrikum.

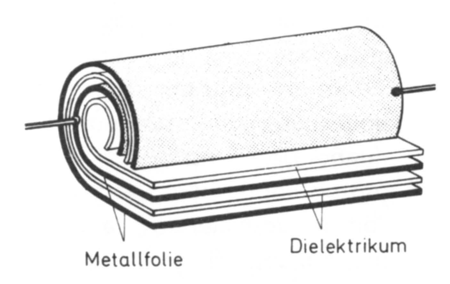


Bild 44. Raumspartechnik: Die Platten des Kondensators werden samt Isolierfolien einfach aufgewickelt.

Die Maßeinheit für die Kapazität – das Farad – ist nach dem berühmten englischen Physiker Michael Faraday benannt; leider ist es unhandlich groß. In der Praxis haben wir es deshalb nur mit außerordentlich kleinen Teilen von einem Farad zu tun, beispielsweise mit dem Mikrofarad (μF), das sind ein Millionstel Farad, oder in der Radiotechnik sogar nur mit Pikofarad (pF), einem Billionstel Farad. Da unsere Schaltbilder, modern wie unsere Zeit nun mal ist, von einem Computer gezeichnet wurden, haben sie einen Schönheitsfehler: Das CAD-Programm (**C**omputer **A**ided **D**esign) beherrscht nicht

mals wesentlich schneller, wenn wir für R4 einen 3,3-kΩ-Widerstand einstecken. Unser Ohr kann die einzelnen Knackser kaum noch richtig auseinanderhalten. Sie verschmelzen schon fast zu einem Ton, obgleich der Ausdruck Geknatter wohl richtiger wäre. Bei diesem Versuch sind gleich mehrere sehr wichtige Dinge festzuhalten.

1. Die Häufigkeit eines Vorgangs – in unserem Fall die eines Knacks – nennt man Frequenz. Die Frequenz ist umso höher, je häufiger der Vorgang innerhalb einer Sekunde stattfindet.
2. Die Frequenz eines Multivibrators ist umso höher, je kleiner die verwendeten Kondensatoren sind und
3. Sie ist umso höher, je kleiner die verwendeten Widerstände sind.

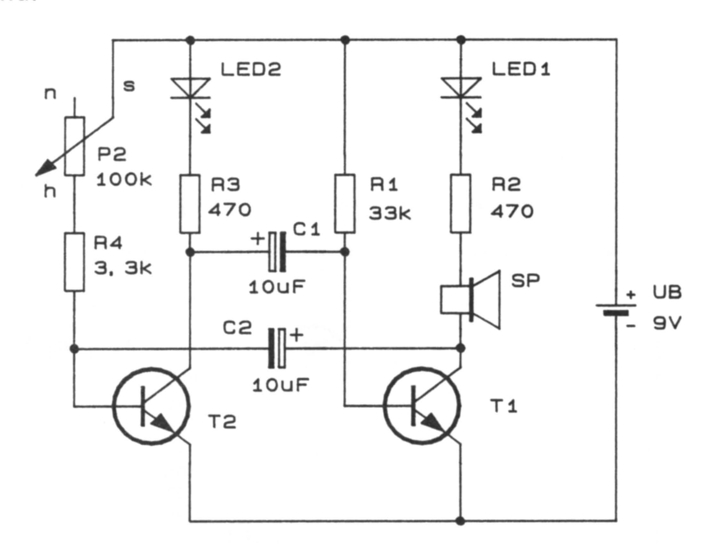


Bild 45. Mit dem Potentiometer P2 läßt sich die Frequenz des Multivibrators stufenlos verändern.

Jetzt gehen wir noch einen Schritt weiter und ersetzen den 15-kΩ-Widerstand R4 durch die Reihenschaltung aus dem 3,3-kΩ-Widerstand und dem Potentiometer P2 (Bild 46). Dadurch sind wir in der Lage, die Frequenz unseres Multivibrators stufenlos zu verändern. Vom langsamen Warnblinker bis zur Knattermaschine. In der „schnellsten" Stellung beträgt die Frequenz (Knackse pro Sekunde) unserer Knattermaschine etwa 25. Zu Ehren des deutschen Physikers Heinrich Hertz wird die Frequenz in Hertz gemessen, also 25 Hertz oder abgekürzt 25 Hz. Bei etwa 25 Hz beginnt das Blinken der Leuchtdiode, zu einem gleichmäßig dunkleren Leuchten zu verschmelzen.

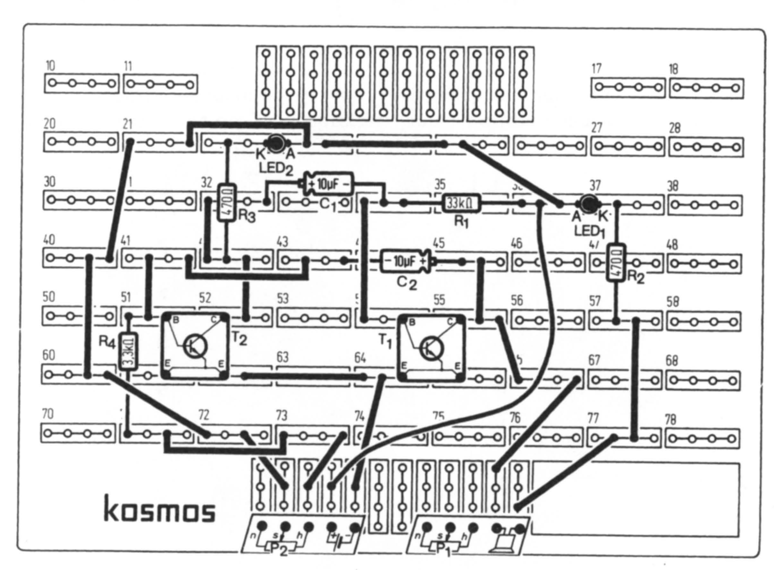


Bild 46. Aufbau zu Schaltung 45.

2.2 Klang und Ton

Wir wissen jetzt, wie sich eine Rechteckfunktion im Lautsprecher anhört: rauh und unmelodisch! Kein Wunder, denn sie ist ja auch nur eine schnelle Folge von Knacksern. Richtige Sprache und Musik muß sich noch aus anderen Schwingungsformen zusammensetzen. In diesem Kapitel wollen wir dem Wesen des „guten Tons" nachgehen. In den Rundfunk- und Fernsehstudios wird ein enorm hoher technischer Aufwand getrieben, um das aufgenommene Programm möglichst unverzerrt zu übertragen. Trotzdem sind manchmal korrigierende (filternde) Maßnahmen erforderlich.

den griechischen Buchstaben μ (Mü). Wir müssen uns deshal mit dem Buchstaben u helfen. Wenn im Schaltbild also 10 uF steht, müßte es eigentlich 10 μF heißen.
Hinweis: Es kann sein, daß bei einem fabrikneuen Elektrolytkondensator die LED trotzdem dauernd brennt. Der Elko muß dann zuerst formiert werden, d.h. mehrfach auf- und entladen werden.



Know-how: Potential – die (Spannungs-) Stockwerke einer Schaltung (zu S. 26)

Alle Höhenangaben in Landkarten werden auf Meereshöhe, das sogenannte Normal-Null (NN), bezogen. Das Niveau, auf das alle Spannungen (die sogenannten „Potentiale") einer Schaltung bezogen werden, ist die Masse – man bezeichnet sie als 0 V. Sie ist bei unseren Schaltungen identisch mit dem Minuspol der Batterie (es gibt auch Schaltungen, bei denen der Pluspol zur Masse erklärt wurde!). Das höchste Stockwerk

Experimente

Mehr Saft: Multivibrator mit AMP-Modul

Die verfügbare Lautstärke war zugegebenermaßen bis jetzt etwas mickrig. Wir verwenden jetzt das Verstärkermodul (Bild 47). Auf dem Modul sind die Buchstaben AMP aufgedruckt. AMP ist die Abkürzung für das englische Wort Amplifier, das heißt nichts anderes als Verstärker. Mit dem AMP-Modul läßt sich ganz hervorragend ein Multivibrator aufbauen (Bild 48). Besonders gut funktioniert die Variation der Frequenz durch Einknopfbedienung am Poti P1. Unser Multivibrator – wir können auch Rechteckgenerator dazu sagen – schwingt auf recht hohen Frequenzen. Das Geknatter erfolgt also so häufig, daß es zu einem singenden Ton geworden ist. Die jüngeren Mitglieder der Familie werden bestimmt noch den Ton hören, auch wenn das Poti P1 ganz nach rechts verdreht wurde. Dann gibt der Rechteckgenerator seine höchste Frequenz ab. Sofern es gelingt, auch Opa für dieses „neumodische Zeug" zu begeistern, werdet Ihr feststellen, daß er die ganz hohen Töne nicht mehr hören kann. Die sogenannte Altersschwerhörigkeit zeigt sich nämlich in erster Linie nicht darin, daß man alles ein bißchen leiser hört, sondern daß die hohen Töne nicht mehr wahrgenommen werden.

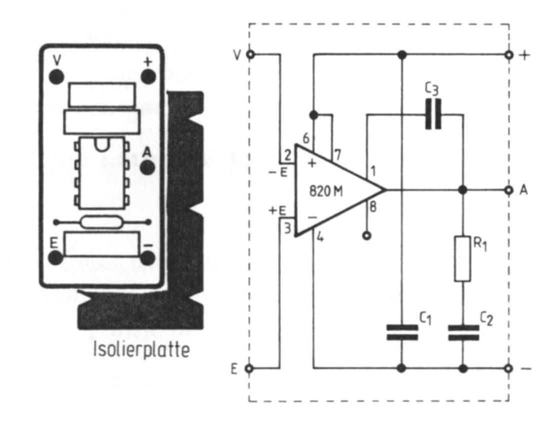


Bild 47. Das Kosmos Verstärkermodul (AMP) mit vollständiger Beschaltung. In den nachfolgenden Schaltungen wählen wir dagegen eine vereinfachte Darstellung.

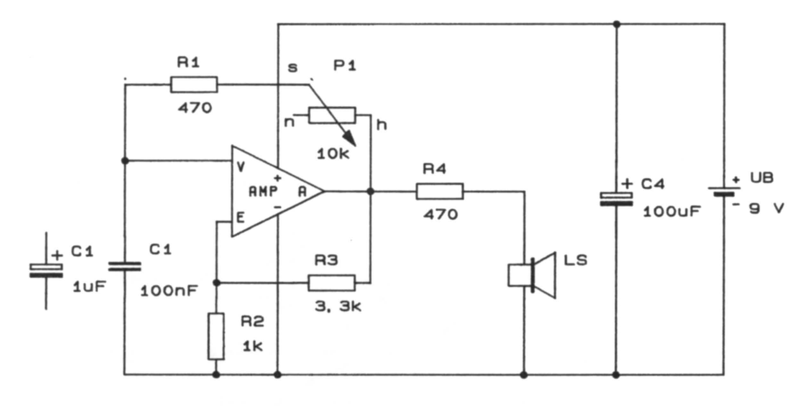


Bild 48. Ein Multivibrator mit AMP-Modul

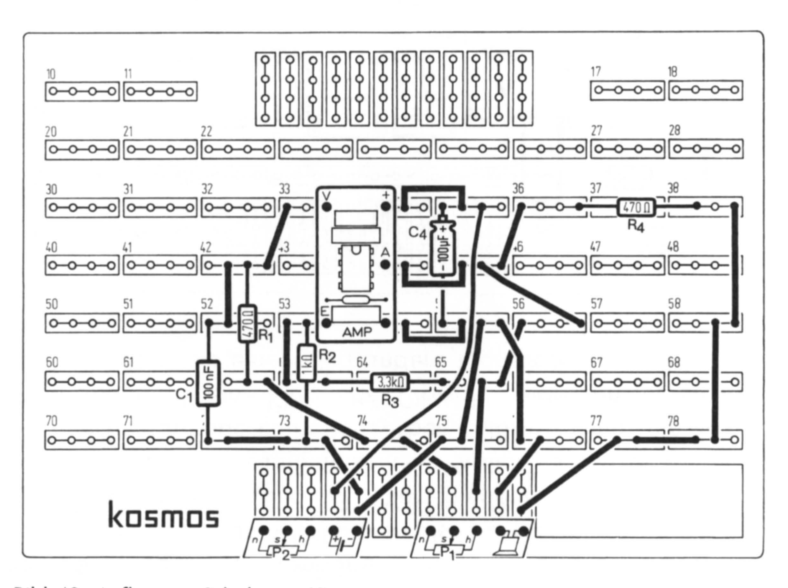
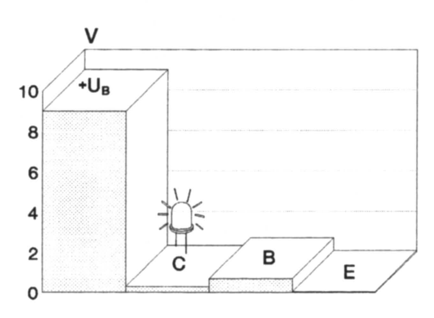


Bild 49. Aufbau zu Schaltung 48.

ist die Batteriespannung (in unserem Fall +9 V). Alle anderen Spannungen liegen irgendwo dazwischen. Z. B. „wohnt" der untere Anschluß von R1 auf derselben Etage wie die Basis von T 1. Man sagt, der Anschluß liegt auf Basispotential.



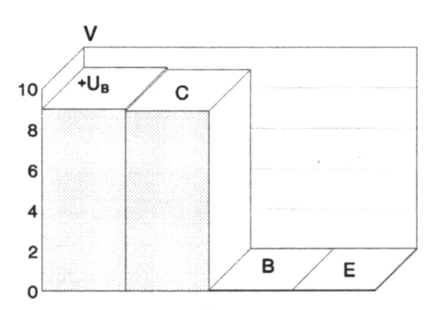


Bild 50. Die Potentiale einer Inverterschaltung: Bevor die Taste gedrückt wird, ist das Kollektorpotential niedrig, und die Leuchtdiode leuchtet (oben). Nach dem Tastendruck ist das Basispotential gleich Null (die Taste schließt kurz) und das Kollektorpotential – aus reiner Bosheit – hoch.

C bestimmen die Frequenz

Wir stecken jetzt anstelle von C1 den 1-μF-Kondensator ein. Der Ton, sofern man überhaupt noch von einem solchen reden kann, ist wesentlich tiefer geworden. Und wir hören wieder unser bekanntes Knattern.

Klangbild: Die Farbe im Ton

Wir erweitern den Rechteckgenerator um die beiden Taster Ta1, Ta2 und die beiden Kondensatoren C2 und C3 (Bild 52). Beim Drücken des Tasters Ta1 überbrücken wir mit dem Kondensator C2 den 470-Ω-Widerstand. Der Ton im Lautsprecher wird sofort aggressiver, greller. Dabei bleibt die Frequenz, d.h. die Tonhöhe, aber gleich. Beim Drücken des Tasters Ta2 ergibt sich genau der gegenteilige Effekt. Bei wiederum gleichbleibender Tonhöhe wird der Ton weicher, runder. Wie ist das zu erklären? Wir wissen, der Kondensator läßt die Ein- und Ausschaltknackse sehr gut durch. Den Gleichstromanteil zwischen den Flanken einer Rechteckfunktion dagegen nicht. Wenn der Widerstand R4 von einem Kondensator überbrückt wird, heißt das, daß am Lautsprecher eben die steilen Flanken wesentlich kräftiger wirksam werden. Wenn wir dagegen einen Kondensator parallel zum Lautsprecher schalten (C3 über Ta2), dann werden die Ein- und Ausschaltknackse kurzgeschlossen, der Lautsprecher bekommt

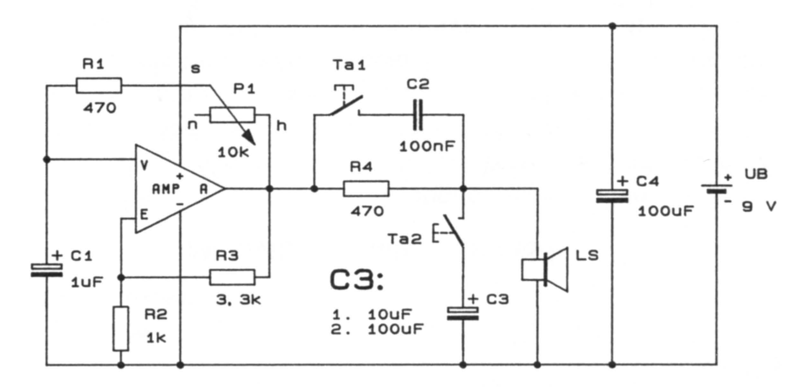


Bild 51. Klangfarbe: Mit Ta1 wird der Ton rauher, mit Ta2 weicher.

nur ein abgerundetes Rechteck zu spüren. Besonders weich wird der Ton, wenn wir den 10-μF-Kondensator C3 gegen einen mit 100 μF auswechseln. Die Wirkung der Kondensatoren ist nicht bei jeder Frequenz (= Tonhöhe) gleich. Wir probieren verschiedene Frequenzen aus. Wir können also bei gleicher Tonhöhe die Klangfarbe ändern (Bild 53). Verschiedene Musikinstrumente müssen, wenn sie zusammenspielen wollen, selbstverständlich die gleiche Tonhöhe einhalten. Aber natürlich klingt ein Saxophon anders als eine Klarinette. Obwohl beide den selben Ton spielen, haben sie eine völlig andere Klangfarbe.

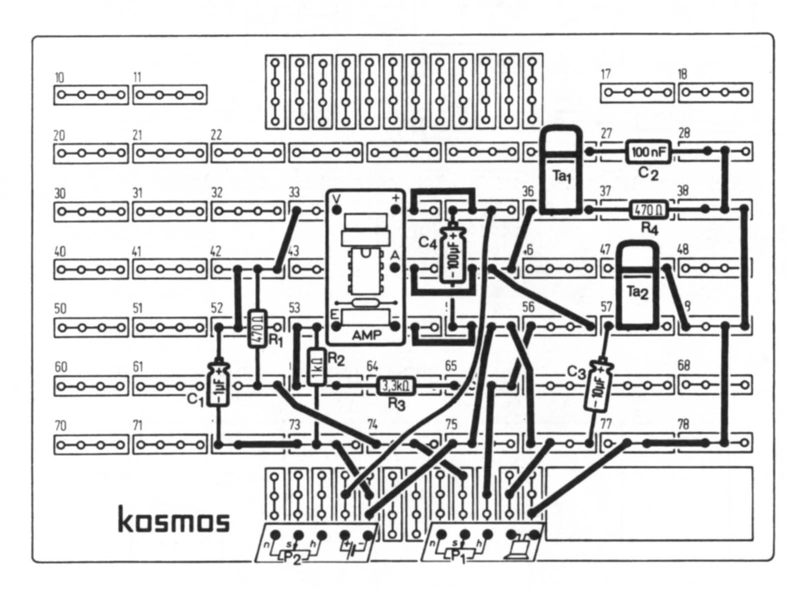


Bild 52. Aufbau zu Schaltung 51.



Know-how: Filter beeinflussen die Klangfarbe

Mit Taster Ta1 haben wir ein sogenanntes Hochpaßfilter, gebildet aus C2 und dem Lautsprecher, eingeschaltet. Nur die hochfrequenten Obertöne konnten passieren. Beim Drücken von Ta2 wurde dagegen ein Tiefpaßfilter, bestehend aus R4 und C3, aktiv. Hier konnten nur die tiefen Frequenzen durchschlupfen. Eselsbrücke: Beim Tiefpaßfilter liegt in der Schaltzeichnung der Kondensator tiefer als der Widerstand.

Know-how: Verzerrung mit viel Harmonie

Wir haben festgestellt, daß ein Ton umso weicher klingt, je runder seine Schwingungsform ist. Das Pendel einer alten Uhr schwingt auch nicht ruckweise hin und her, sondern wird beim Hinaufschwingen immer langsamer, kommt

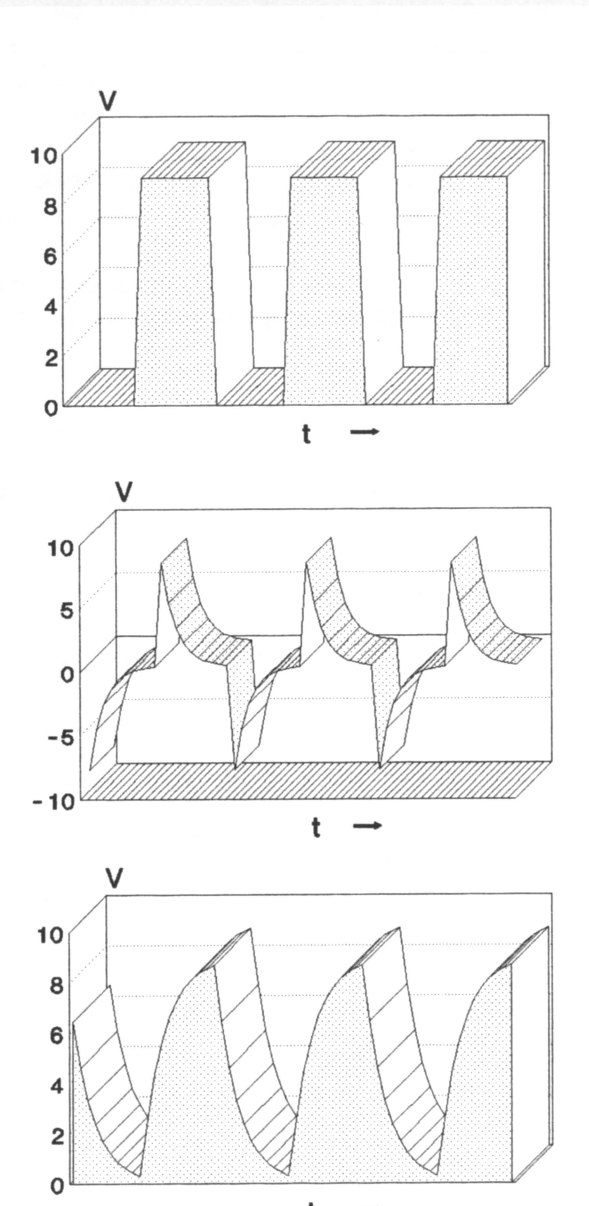


Bild 53. Die Schwingungsformen der Spannung am Lautsprecher: Der Multivibrator erzeugt eine Rechteckfunktion (oben). Beim Drücken von Ta1 gelangen hauptsächlich die scharfen Flanken im Ein- und Ausschaltmoment an den Lautsprecher (Mitte). Beim Drücken von Ta2 werden die Rechtecke dagegen abgerundet (unten).

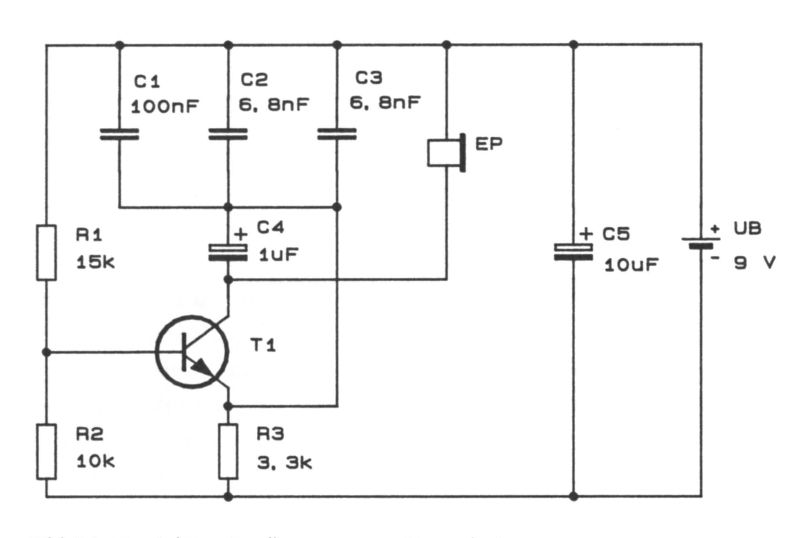


Bild 54. Ein Colpitts-Oszillator erzeugt Sinusschwingungen.

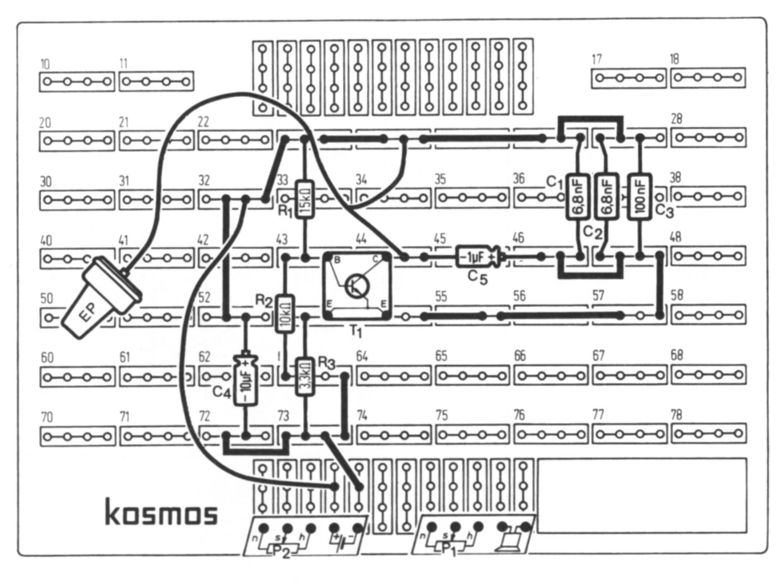


Bild 55. Aufbau zu Schaltung 54.

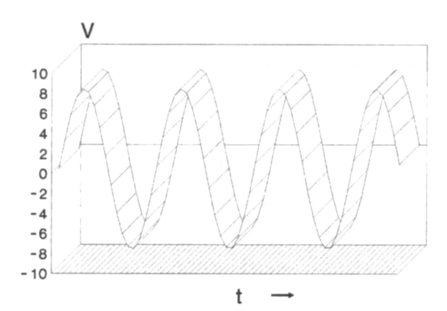


Bild 56. Sinusschwingungen sind „reine", aber langweilige Töne.

schließlich für einen kurzen Moment zum Stillstand, um dann wieder mit zunehmender Geschwindigkeit nach unten zu fallen. Es schwingt sodann über die Mittellage hinaus, wird dann auf der anderen Seite wieder langsamer usw. Wenn wir diese Schwingungsform zeitlich auflösen, erhalten wir eine Sinusschwingung (Bild 57).

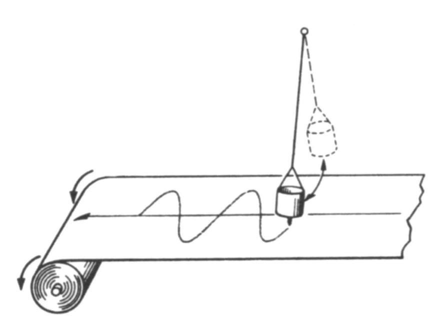


Bild 57. So kann man sich das Entstehen einer Sinuskurve vorstellen.

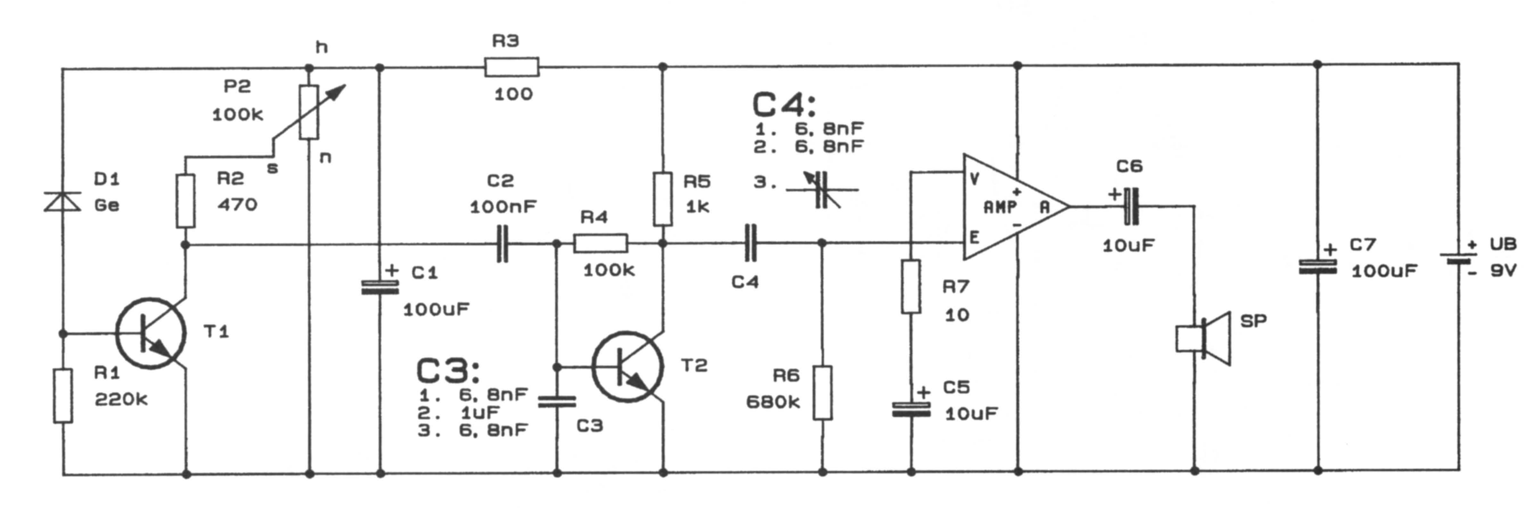


Bild 58. Ein Rauschgenerator mit Germaniumdiode. Durch Wechseln der Kondensatoren C3 und C4 kann man die Klangfarbe des Rauschens ändern.

Ton: Die sanfte Schwingung

Wir wollen jetzt eine „reine", eine sogenannte Sinusschwingung elektronisch erzeugen. Dazu benutzen wir eine Oszillatorschaltung (Bild 54; oszillieren = schwingen), über deren genaue Funktionsweise wir uns später noch ausführlich unterhalten wollen. Wir hören im Ohrhörer das erwartete Ergebnis, der Ton ist rund und weich.

2.3 Rauschen: Der elektronische Wasserfall

Musikfreund Gustav Allegro schäumt wieder einmal vor Zorn: Seine Lieblingssonate in D-Dur, Direktübertragung aus der Philharmonie in Berlin, ist vor lauter Rauschen kaum aufzunehmen. Rauschen beeinflußt leider oft genug den ungestörten Hörgenuß von Schallplatten und schwachen Rundfunksendern. Rauschen entsteht auch, wenn der Wind durch die Blätter der Bäume streicht oder wenn die Brandung des Meeres gegen die Klippen schlägt. Wie kommt das Geräusch ins Radio?

Experimente

Rauschgenerator

Auch das Rauschen können wir mit den bisher erarbeiteten Erkenntnissen erklären. Dazu wollen wir es uns zunächst elektronisch erzeugen. Außer den Leuchtdioden haben wir noch eine Germaniumdiode in unserem Bauteilepack. Bisher haben wir gesagt, eine Diode läßt den Strom nur in der einen Richtung durch. Jetzt beweisen wir, daß auch „rückwärts" Strom durch eine Diode fließen kann (Bild 59). Wir schalten unsere Diode also diesmal in Sperrichtung in den Stromkreis, sorgen aber durch einen genügend hohen Vorwiderstand (R1) dafür, daß die Diode keinen Schaden nehmen kann, denn sie „bricht durch". Zum Glück nur elektrisch! Genügend hohe Spannung vorausgesetzt, fließt tatsächlich auch in Sperrichtung ein Strom durch die Diode. Dabei ist die Geschwindigkeit und die Richtung der Elektronen besonders ungleichmäßig verteilt, also sprich: es prasselt besonders stark. Der Rest der Schaltung dient dann eigentlich nur noch der Verstärkung, um das Rauschen im Lautsprecher hörbar zu machen.

Den Namen hat diese Schwingungsform von der bekannten Winkelfunktion, mit deren Hilfe man die Kurve berechnen kann. Eine Sinusschwingung wird auch als harmonische Funktion bezeichnet. Wer einen „Sinuston" hört, versteht die Bezeichnung auch ohne nähere Erklärung sofort. So sanft dieser Ton aber auch klingt, ein Musikinstrument, das nur reine Sinusschwingungen erzeugt, würde völlig langweilig klingen. Im Jahre 1802, als von Elektronik natürlich noch keine Rede war, behauptete der französische Mathematiker Jean Baptiste Fourier, daß man jede noch so zerzauste Schwingung aus vielen harmonischen Schwingungen zusammensetzen könnte. Aber auch die Umkehrung ist richtig. Jede noch so verzerrte Schwingung läßt sich in reine Sinusschwingungen zerlegen. Die Frequenz dieser Sinusschwingungen ist aber nicht willkürlich verteilt, sondern ist immer ein Vielfaches der Grundfrequenz der jeweiligen Schwingung. In Bild 62 haben wir aus drei Sinusschwingungen schon eine ganz passable Rechteckschwingung zusammengebastelt. Die zusammen-

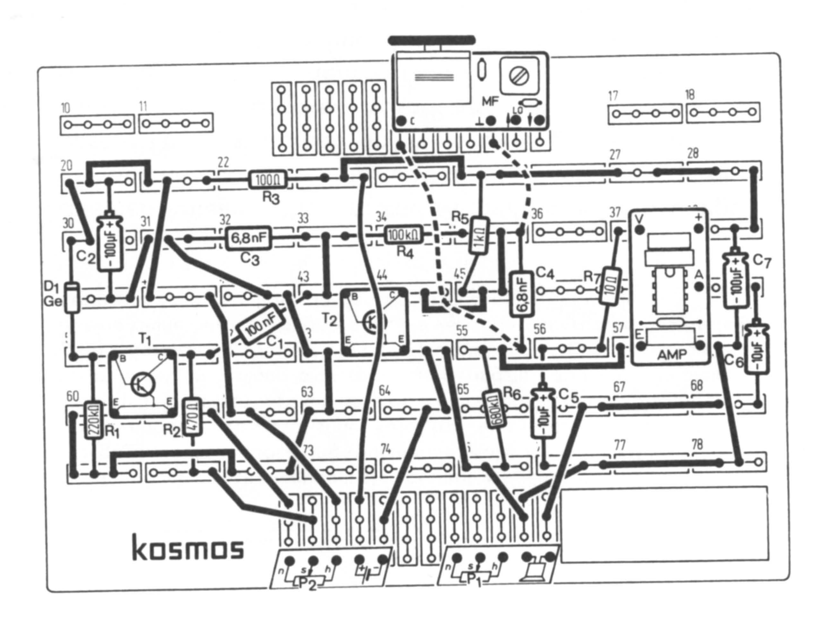


Bild 59. Aufbau zu Schaltung 58.

Es rauscht auf allen Frequenzen

Rauschen ist, grob gesagt, die gemeinsame Anwesenheit aller Frequenzen. Da man in der Optik die gemeinsame Anwesenheit aller Lichtfarben als weiß bezeichnet, spricht man hier auch vom sogenannten weißen Rauschen. Wenn wir beim Kondensator C3 anstelle des 6,8 nF einen mit 1 μF Kapazität einstecken, werden die höherfrequenten Anteile des Rauschens kurzgeschlossen, und wir hören sozusagen nur den „Baß". Man meint, die Elektronen einzeln prasseln zu hören. Um wieder unseren Vergleich mit der Optik aufzunehmen, müßten wir jetzt von rotem Rauschen sprechen.

Zisch – ein elektronischer Dampfloksimulator

Als nächstes setzen wir in Aufbau 59 den 6,8 nF-Kondensator wieder zurück und verwenden bei C4 anstelle des 100 nF-Kondensators den Drehkondensator auf dem MF-Modul (gestrichelte Leitungen in Bild 59). Ein Drehkondensator ist ein veränderlicher Kondensator. Wie er im Prinzip aufgebaut ist, zeigt Bild 63. Wenn wir jetzt erneut einschalten, erinnert unser Rauschen eher an das Pfeifen einer Dampflok, es ist zu einem hellen Zischen geworden. Am Abstimmknopf des Drehkondensators – er wirkt wie ein Hochpaßfilter – kann man sogar noch die Klangfarbe des Zischens ändern. Im Rauschen sind jetzt nur die höherfre-

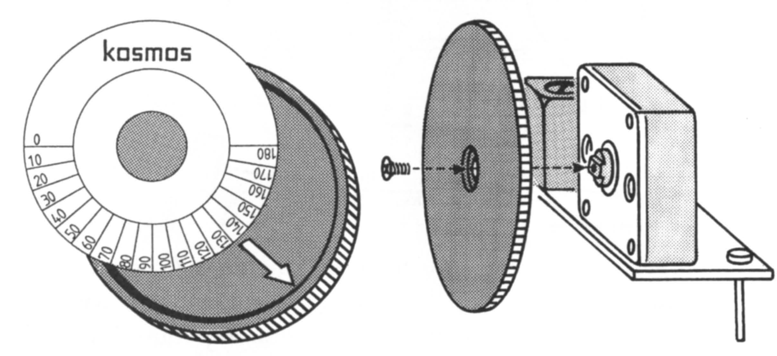


Bild 60. Drehknopf (Abstimmrad) mit Skala bekleben und am Drehkondensator befestigen.

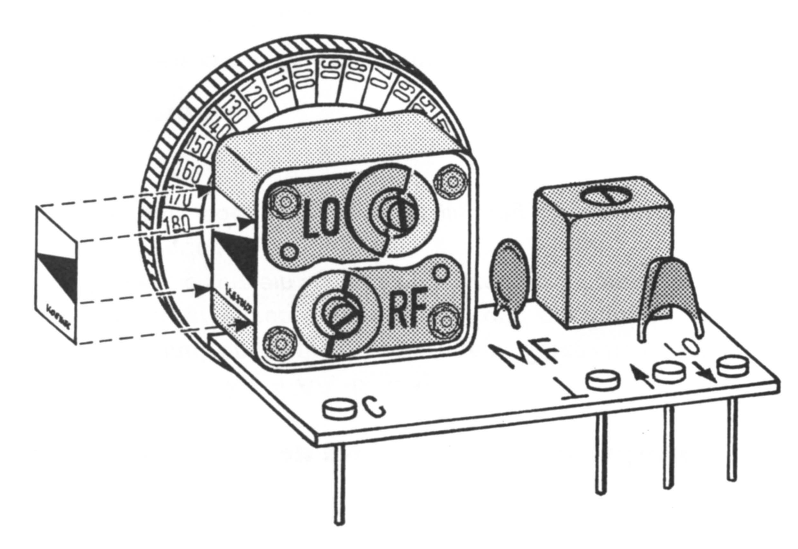


Bild 61. Ablesemarkierung seitlich ankleben.

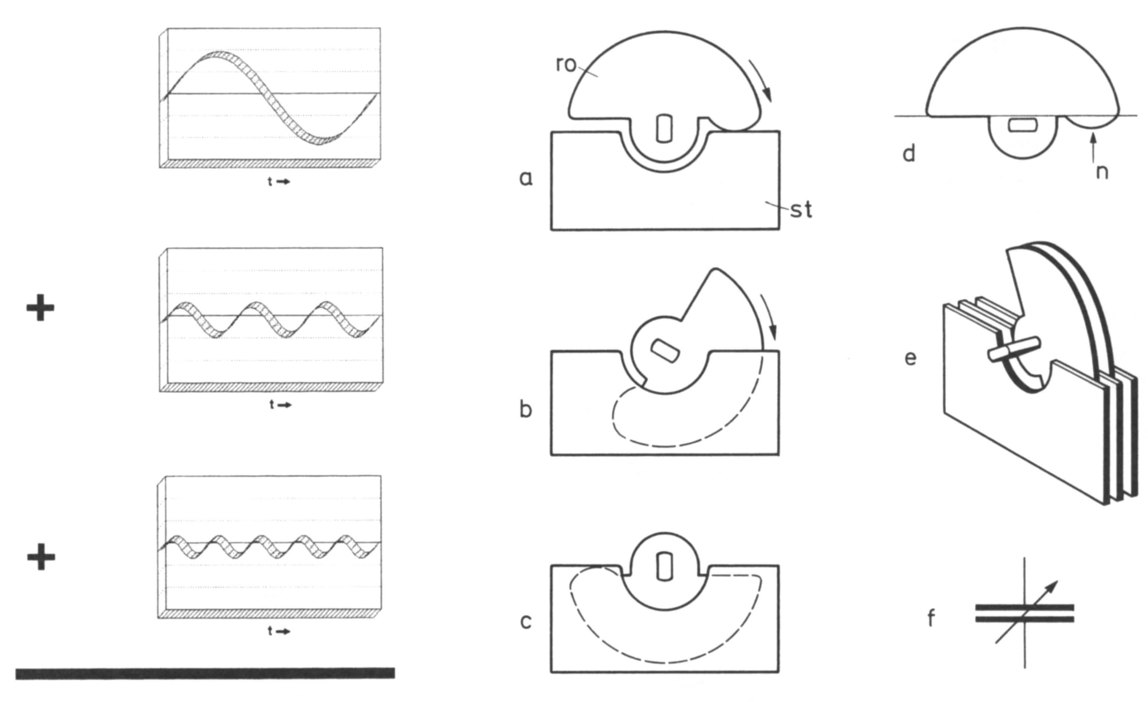


Bild 62. Aus Sinusschwingungen können alle anderen Schwingungsformen zusammengebaut werden. In unserem Bildbeispiel entsteht schon eine ganz brauchbare Rechteckschwingung, wenn zu einer Sinusschwingung noch zwei andere von jeweils der 3-fachen und der 5-fachen Frequenz dazuaddiert werden. So funktionieren Musik-Synthesizer.

Bild 63. Auch ein Drehkondensator besteht wie jeder andere Kondensator aus sich gegenüberstehenden und voneinander isolierten Platten. Ein Plattenpaket ist aber drehbar gelagert; es ist der Rotor (ro). Das feststehende Plattenpaket heißt Stator (st). Elektrisch wirksam ist nur die Plattenfläche des Rotors, die sich im Stator befindet. In Stellung a ist somit die geringste Kapazität – in Stellung c die größte Kapazität eingestellt. An den Rotorplatten von guten Drehkondensatoren ist eine kleine Nase (n) angebracht. Sie verhindert ein ruckartiges Ansteigen der Kapazität wenn der Rotor in den Stator hineingedreht wird.

quenten Anteile enthalten, und wir müßten es demzufolge blaues Rauschen nennen. Rotes und blaues Rauschen sind aber nur unsere Phantasienamen. In Wirklichkeit gibt es nur noch den Ausdruck rosa Rauschen. Rosa Rauschen ist ein bestimmter Frequenzausschnitt aus dem weißen Rauschen, der gerne zum Testen von Verstärkern und Audioanlagen benutzt wird. Durch langsames Hin- und Herdrehen können wir auch das Heulen des Sturmes nachahmen. Der Rauschgenerator wird zur elektronischen Windmaschine!

2.4 Information pur: Sprache und Musik

„DJ 6 NS ruft KV 4 AA, bitte kommen!"
Funker benutzen amtlich eingetragene Rufzeichen. Am Rufzeichen ist zu erkennen, aus welchem Land die Funkstation sendet und ob es sich um ein Schiff, ein Flugzeug oder um eine Amateurstation handelt.
Am Anfang jeder Sprechfunkverbindung steht zuerst ein Mikrofon.

Experimente

Wir bauen einen Mikrofonverstärker

Als Mikrofon benutzen wir in Aufbau 64 den Lautsprecher, denn die Sache ist auch umkehrbar. Der Transistor T 1 dient als Vorverstärker. Er verstärkt die aus dem Lautsprecher kommende äußerst geringe Spannung. Die beiden Kondensatoren C1 und C2 lassen den Sprach-Wechselstrom, denn um einen solchen handelt es sich, problemlos durch. Mit dem Poti P1 stellen wir die

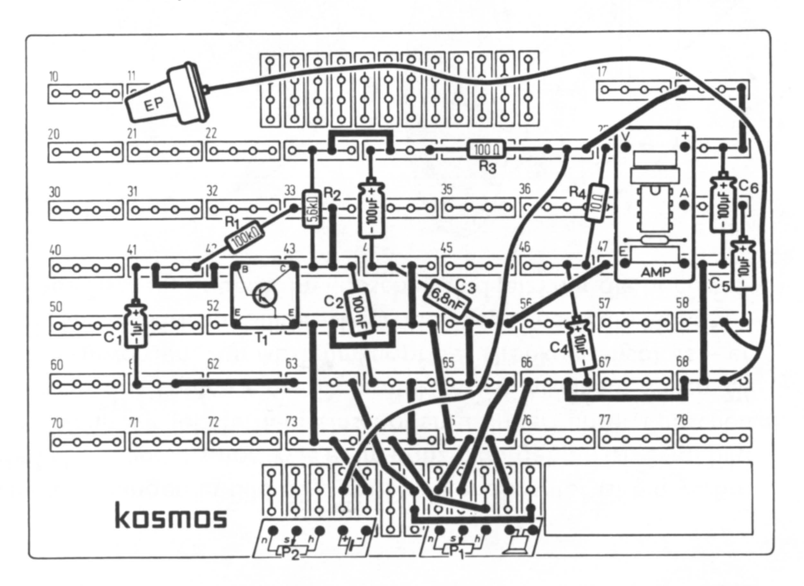


Bild 64. Aufbau zu Schaltung 65.

gesetzte Schwingungsform entsteht, indem man zu jedem Zeitpunkt die momentane Schwingungsweite (Amplitude) der drei Sinusschwingungen zusammenzählt und neu ins Diagramm einzeichnet. In unserem Beispiel haben wir dazu Sinusschwingungen der 3-fachen und der 5-fachen Frequenz benutzt, wobei die Schwingungsweite der 3-fachen Frequenz nur ein Drittel der Schwingungsweite der Grundfrequenz beträgt, die Schwingungsweite der 5-fachen Frequenz beträgt gar nur ein Fünftel der ursprünglichen. Man nennt diese Vielfachen einer Frequenz auch Oberwellen oder Harmonische. Wo immer Abweichungen von der Sinusschwingung auftreten (z.B. durch Verzerrung im Verstärker), entstehen also Oberwellen oder Obertöne. Die Klangfarbe eines Instrumentes oder einer Stimme ist also nichts anderes als die unterschiedliche Zusammensetzung der Schwingungsform aus Obertönen.

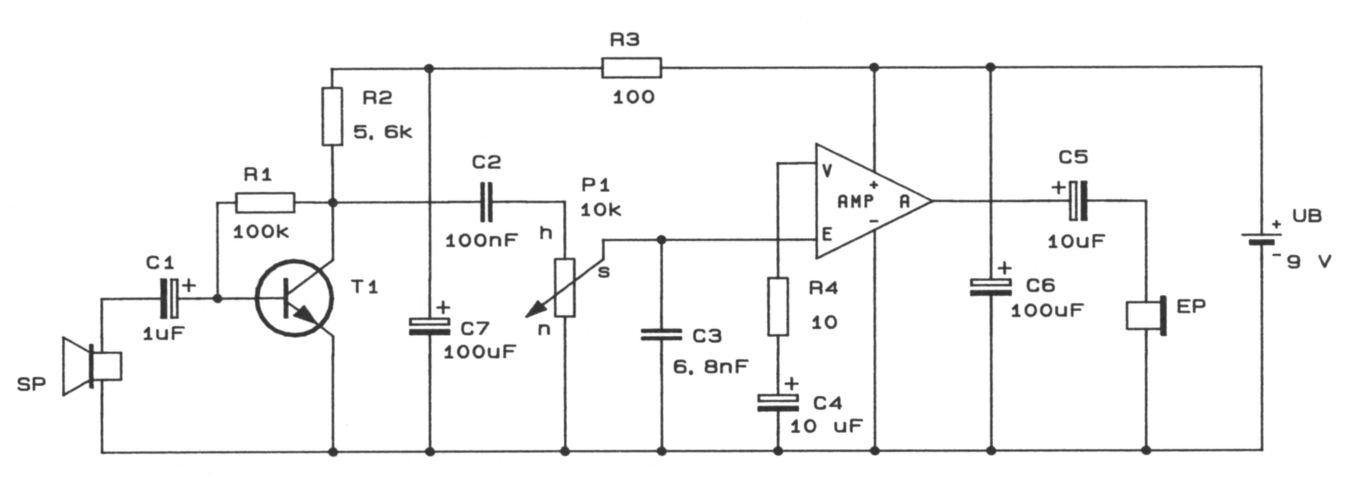
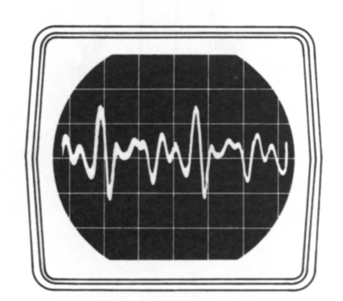


Bild 65. Ein Mikrofonverstärker. Der Lautsprecher wird als Mikrofon zweckentfremdet, Transistor T 1 bildet den Vorverstärker, und das AMP-Modul schließlich ist der Leistungsverstärker.

Lautstärke ein. Das AMP-Modul muß dagegen die eigentliche Arbeit leisten. Es produziert soviel „Saft", daß auch sehr leise Geräusche im Raum im Ohrhörer wahrgenommen werden können. Wenn wir vorsichtig unser Mikrofon (den Lautsprecher) anblasen, hören wir wieder das Rauschen, diesmal menschlich erzeugt.

Sprache ist Information

Wir sind jetzt in der Lage, Geräusche elektronisch zu erzeugen. Es wird Zeit, daß wir uns mit dem Wesen der Sprache selbst befassen. Unsere Sprache benutzt alle Arten von Tönen und Geräuschen in einer sehr trickreichen Mischung und Aufeinanderfolge. Wir stellen uns vor, ein Raumschiff mit Bewohnern ferner Galaxien sei bei uns gelandet, mitten auf dem Marktplatz. Nehmen wir weiterhin an, daß man auf dem Herkunftsplaneten unserer Besucher zur Verständigung untereinander nicht Sprache, sondern direkte Gedankenübertragung benutzt. Staunend würden diese Besucher in ihr Logbuch später schreiben, daß sich die Bewohner des blauen Planeten (der Erde) dadurch verständigen, daß sie sich eine scheinbar willkürliche Folge von Zisch-, Schmatz-, Grunz- und Schnalzlauten, vermischt mit einigen langgezogenen harmonischen Lauten, zurufen. Ist es nicht eine erstaunliche Tatsache, daß wir im Laufe unserer Kindheit gelernt haben, diese Folge von Lauten so in ihrer Bedeutung zu verstehen, daß wir gar nicht mehr die einzelnen Laute selbst beachten, sondern nur noch deren Informationsinhalt? In der Schule haben wir weiterhin gelernt, eine bestimmte Anhäufung von Tinte oder Druckerschwärze auf dem Papier ebenfalls als Information zu deuten. Sehen wir uns auf Bild 67 den stark vergrößerten Buchstaben eines Nabeldruckers an.



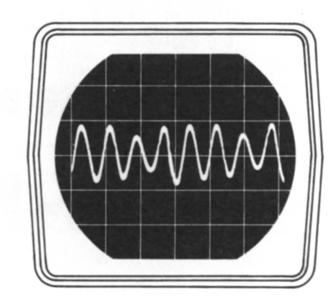
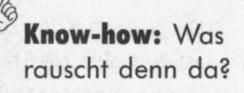
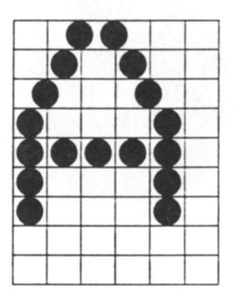


Bild 66. Die Vokale „a" und „o" als Oszillogramm.



Know-how: Was rauscht denn da?

Der elektrische Strom ist bekanntlich die Gesamtheit der sich gerichtet bewegenden Elektronen. Auf ihrem Weg durch Drähte, Widerstände und andere Bauteile ecken sie überall an. Sie prasseln förmlich wie Erbsen durch ein grobes Sieb. Deshalb ist der gleichste Gleichstrom immer nur der statistische Mittelwert von vielen kleinen zuckenden Strömchen. Der experimentelle Beweis dafür läßt sich mit jedem voll aufgedrehten Verstärker ohne angeschlossene Signalquelle erbringen: Im Lautsprecher hört man die Erbsen, Verzeihung, die Elektronen prasseln. Nun erstreckt sich das Prasseln, ich will sagen das Rauschen, nicht nur auf den hörbaren Bereich, sondern alle Bauteile „rauschen" auch im Radiowellen-Bereich und können so den Empfang schwacher Sender stark beeinträchtigen.



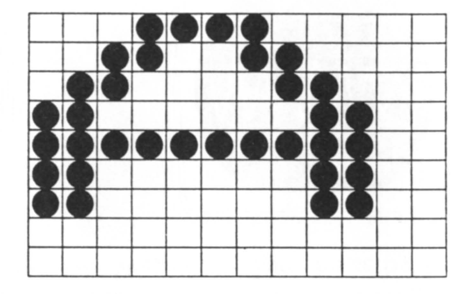


Bild 67. Ein Analphabet sieht in diesem Muster nur willkürlich verteilte Punkte. Für jeden, der lesen gelernt hat, stellt diese Anhäufung von Druckerschwärze jedoch die Information „A" dar.

Jeder, der lesen gelernt hat, wird diese scheinbar willkürliche Anhäufung von Druckerschwärze immer als die Information „A" lesen. Wir müssen unterscheiden: die Druckerschwärze auf dem Papier ist das Medium, das Mittel zum Weitergeben der Information, die Information ist die Bedeutung der Nachricht.

3. Physik des Unsichtbaren: Felder und Wellen

Nur ein Narr wird heute Dinge ablehnen, die er nicht sieht. Wir sind von der Natur nur sehr sparsam mit Sensoren (Sinnesorganen) ausgestattet worden, so daß für uns der größte Teil der uns umgebenden Wirklichkeit ohne Hilfsmittel nicht erfaßbar ist. Aber bei Rundfunk und Fernsehen ist es uns gelungen, mit Hilfe technischer Einrichtungen das „Unfaßbare" zum Zweck der Nachrichtenübermittlung auszunutzen.
Ein besonders wichtiges Bauelement für die drahtlose Nachrichtentechnik ist die Spule. Wir haben eine ganze Reihe von Spulen in unserem Experimentierkasten. Einige sind in den viereckigen, metallischen Abschirmbechern untergebracht wie z.B. auf dem IF-Modul. Die zwei auf dem VHF-Modul sind ganz in Kunststoff eingegossen und haben nur wenige Windungen. Am deutlichsten aber können wir den Aufbau bei der Ferritantenne studieren. Auf einem Stab aus einem besonderen Eisen – dem Ferrit - sind viele Windungen Draht aufgebracht. Die Windungen sind auf zwei Wicklungen aufgeteilt. Die größere Wicklung, die mit den meisten Windungen Draht, ist an den Anschlüssen 1 und 2 angeschlossen. Sie besteht aus einem festen und einem beweglichen Teil. Die kleinere Wicklung ist zwischen die Windungen des fest angebrachten Teils der großen Spule gewickelt und an die Anschlüsse 3 und 4 angelötet. Bei einer Spule handelt es sich also lediglich um einen langen Draht, der aufgewickelt wurde. Wir können uns mit einfachen Versuchen davon überzeugen.

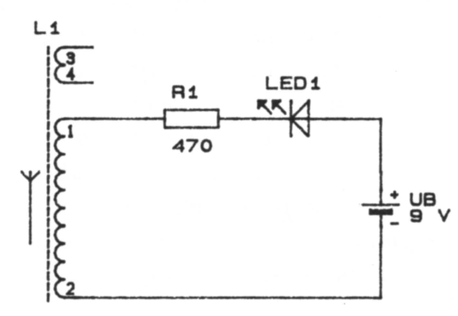


Bild 68. Mit Batterie, Leuchtdiode und Vorwiderstand läßt sich der „Durchgang" prüfen.

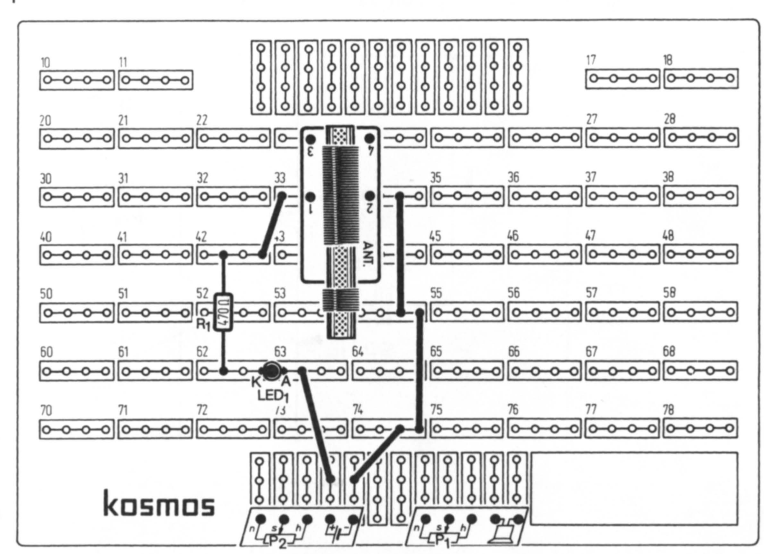


Bild 69. Aufbau zu Schaltung 68.

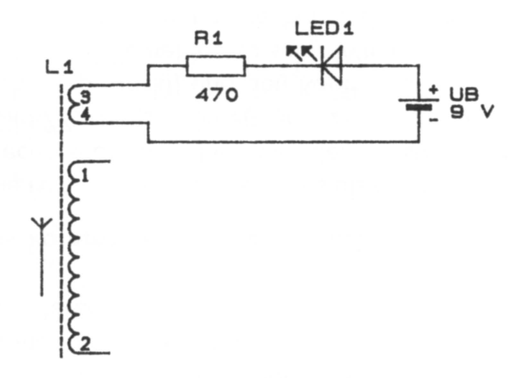


Bild 70. Die Ferritantenne hat zwei Wicklungen.

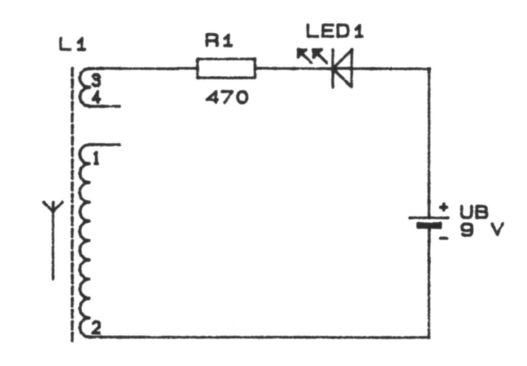


Bild 72. Die Wicklungen haben untereinander keine Verbindung.

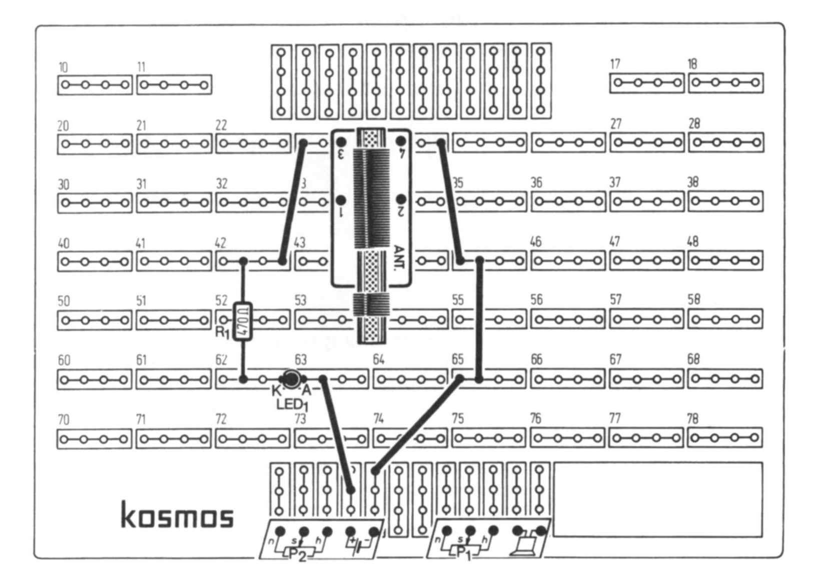


Bild 71. Aufbau zu Schaltung 70.

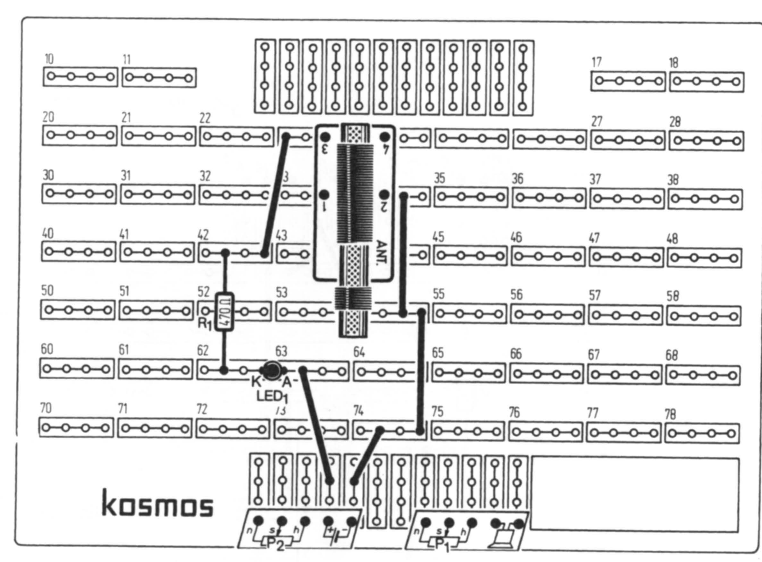


Bild 73. Aufbau zu Schaltung 72.

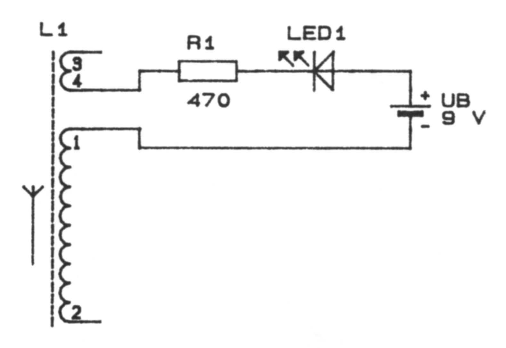


Bild 74. Auch von 4 nach 1 fließt kein Strom.

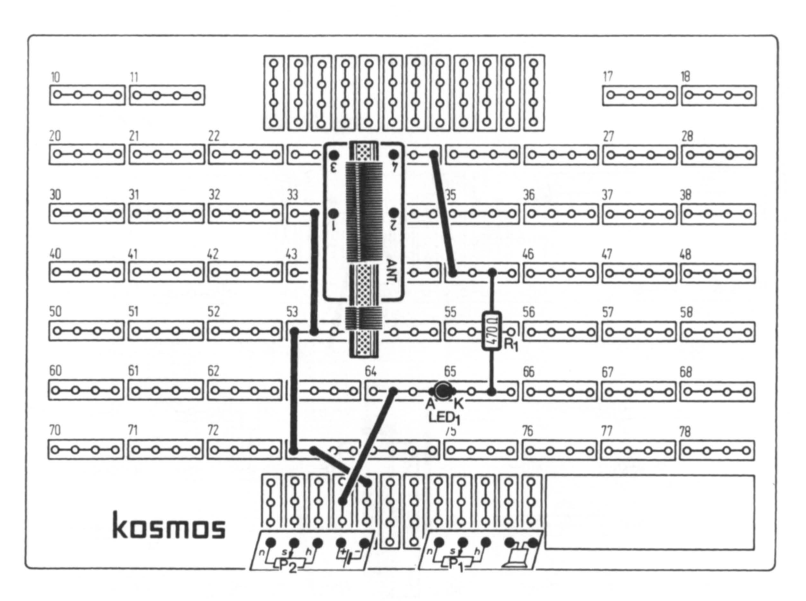


Bild 75. Aufbau nach Schaltung 74.

Experimente

Eine Spule ist auch nur ein Draht

Wir benutzen die Kombination von Leuchtdiode, 470-Ω-Vorwiderstand und Batterie als Durchgangsprüfer (Bilder 69, 71, 73, 75). Die LED leuchtet, wenn wir die Anschlüsse 1 und 2 anschließen. Das gleiche Ergebnis haben wir bei den Anschlüssen 3 und 4. Bei jeder anderen Kombination dagegen leuchtet die Diode nicht. Ein Zeichen dafür, daß auf der Ferritantenne zwei einzelne Drähte unabhängig voneinander aufgewickelt sind, die keine Verbindung untereinander haben.

Horch, was kommt von draußen rein?

Wenn wir die Ferritantenne anstelle des als Mikrofon mißbrauchten Lautsprechers an den Eingang der Verstärkeranlage anschließen (Bild 77, der gestrichelt eingezeichnete Ohrhörer wird zunächst nicht eingesteckt) und den Kondensator C3 entfernen, scheint plötzlich der Teufel los zu sein. Wir hören Sprachfetzen und Musik, und wenn wir unsere Hand der Ferritantenne nähern, brummt es höllisch, und die LED flackert. Wenn im Raum eine Leuchtstofflampe brennt, gibt unser „Geisterstimmenindikator" einen ständigen Summton von sich. Die Geisterstimmen sind natürlich Rundfunksender, die sich alle zusammen gleichzeitig in unserem Verstärker tummeln. Wir können sie weitgehend ausschließen, indem wir C3 wieder einstecken. Schon so manches POP-Konzert ist wegen solcher Einstrahlungen in den Gitarrenverstärkern geplatzt. Hätten sich die Akteure mittels eines kleinen Kondensators zu helfen gewußt, wäre ihre Gage zu retten gewesen.

Leitungssucher

Nun begeben wir uns mit Aufbau 77 auf die Suche nach unter Putz versteckten Leitungen. Der Versuch gelingt am besten, wenn wir sehr starke Verbraucher, beispielsweise einen Haartrockner (Fön) oder einen Heizofen, an die jeweilige Steckdose anschließen. Der Verlauf der Leitungen unter der Tapete ist gut zu verfolgen, indem wir jeweils die größte Brummlautstärke suchen.

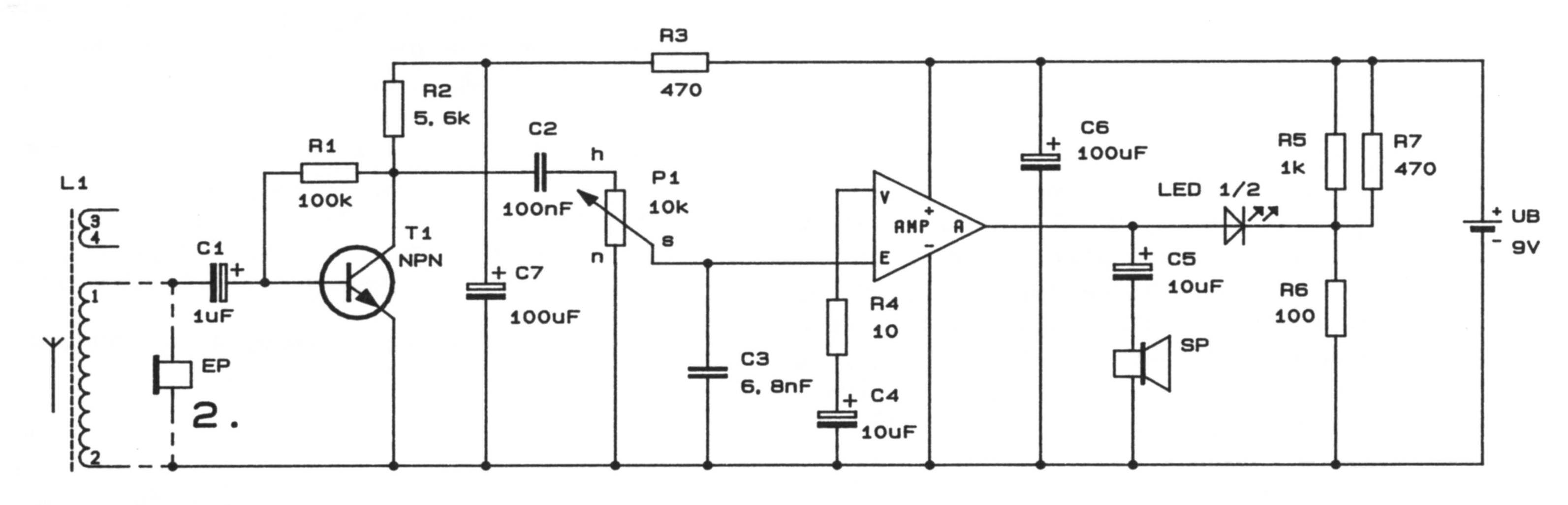


Bild 76. Wir machen Magnetfelder hörbar. Der Ohrhörer EP wird zunächst noch nicht eingesteckt.

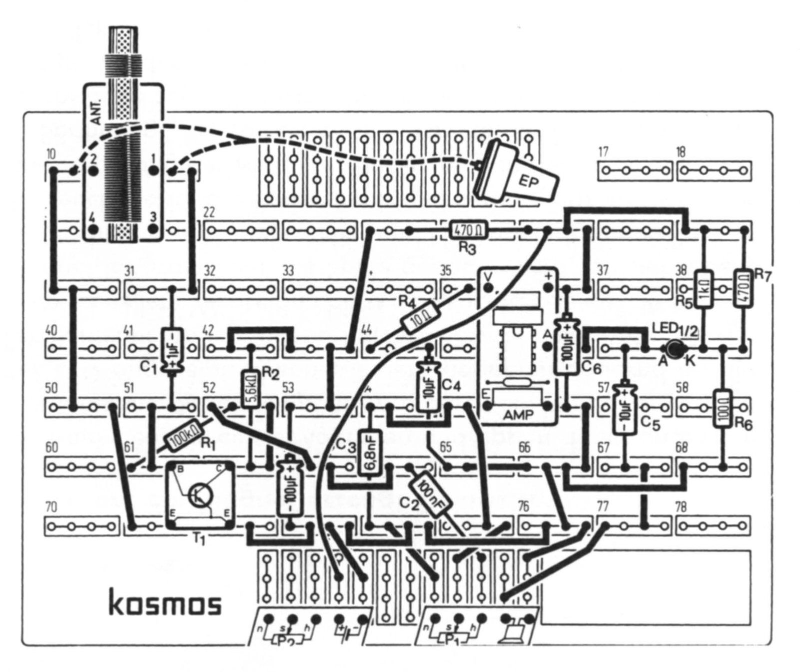


Bild 77. Aufbau zu Schaltung 76.

Kopplung durch die Luft: Telefonverstärker

Wir nehmen den Hörer eines Telefonapparates ab – der Fachmann sagt Handapparat dazu – und warten, bis der Wählton ertönt. Wenn wir an der Außenseite des Telefons mit der Ferritantenne entlangwandern, hören wir an einer bestimmten Stelle – meistens seitlich am Gehäuse – auch den Wählton in unserem Lautsprecher. Auch das längst überfällige Gespräch mit der Großmutter kann jetzt in Zimmerlautstärke abgehört werden.

3.2 Magnetisches Feld

Natürlich ist ein Magnetfeld unsichtbar. Aber wir können die Wirkungen des Magnetfeldes sehen. Beispielsweise ordnen sich Eisenfeilspäne exakt nach dem Verlauf der Feldlinien. Wir hatten das Abhörgerät, die Ferritantenne mit Verstärker und Lautsprecher, nirgendwo angeschlossen. Die Verbindung zum Telefon erfolgte einfach so durch die Luft, genauer gesagt, über ein Magnetnetfeld! Der Zusammenhang zwischen Magnetismus und Elektrizität ist einfacher als man denkt.



Know-how: Übertrager koppeln Stromkreise

Jetzt verstehen wir auch die Funktionsweise eines Telefon-Mithörverstärkers besser. Im Telefon befindet sich meist seitlich angebracht ebenfalls ein Transformator. In der Fernsprechtechnik sagt man Übertrager dazu. Damit wird der Hörer des Telefons induktiv an die Fernsprechleitung angekoppelt. Unsere Ferritantenne kann außen am Telefongehäuse einige Feldlinien des Übertragers aufschnappen. Die winzigen Spannungen, die induziert werden, können wir durch die große Verstärkung hörbar machen. Auch bei Life-Reportagen schließt die Post (Telekom) den Übertragungswagen mittels eines Übertragers an die Leitungen zum Funkhaus an.

Experimente

Induktion: Ein Magnet erzeugt Elektrizität

Jetzt nehmen wir einen Magneten und tippen damit an unsere Ferritantenne. Jedes Antippen wird durch ein helles Aufleuchten der LED angezeigt. Wenn wir den Magneten dauernd an die Ferritantenne halten, passiert nichts. Sowohl beim Antippen wie beim schnellem Wegreißen blitzt die Leuchtdiode auf. Wenn der Magnet langsam über die Spule gerieben wird, passiert ebenfalls nichts. Beim schnellen Hin- und Herreiben dagegen flackert die Leuchtdiode. Die Erklärung ist wiederum ganz einfach: Nur eine Änderung des Magnetfeldes erzeugt in der Spule eine kleine Spannung, die, von unserem Verstärker kräftig verstärkt, der Leuchtdiode zugeführt wird. Wenn die Änderung sehr langsam erfolgt, werden auch nur kleine Spannungen erzeugt. Bei einer schnellen Änderung dagegen werden große Spannungen erzeugt. Da die Physiker des letzten Jahrhunderts glaubten, der Magnet führe die Spannung in die Spule hinein, sprach man von der Wirkung der Einführung, natürlich auf lateinisch: Induktion. Die Änderung des Magnetfeldes erzeugt also Induktionsspannungen.

Lautsprecher und Mikrofon: Angewandte Induktion

Anstelle der Ferritantenne schließen wir in Aufbau 77 jetzt den Ohrhörer an und blasen in ihn hinein. Auch hier leuchtet die Leuchtdiode auf, und wir hören das Kratzen und Rauschen im Lautsprecher. Beim Ohrhörer (Bild 78) wie beim Lautsprecher (Bild 79) ist die Wirkungsrichtung umkehrbar. Beide funktionieren nach dem gleichen Prinzip. In jedem Fall wird dafür gesorgt, daß sich ein Magnet gegenüber einer Spule bewegt. Da die Spule leichter ist als der Magnet, wird sie an der Membran angebracht und der Magnet im Gehäuse fest montiert. Schallwellen, die die Membran erschüttern, ändern das magnetische Feld in der Spule dadurch, daß der Magnet weiter in die Spule eintaucht bzw. weiter herausragt. Dabei entstehen genau wie bei der Ferritantenne kleine Induktionsspannungen in der Spule, die dann weitergeleitet und verstärkt werden.

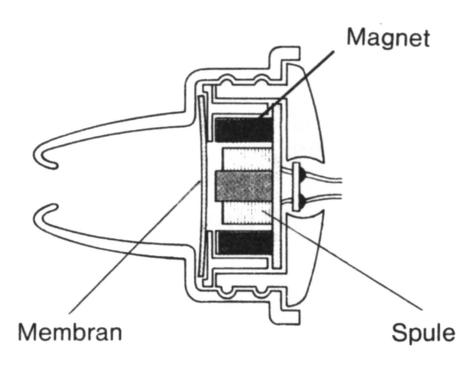


Bild 78. So funktioniert ein Ohrhörer: Das von den Tonfrequenzströmen erzeugte Magnetfeld der Spule überlagert sich dem des Dauermagneten. Dadurch wird die magnetische Membran weniger oder mehr angezogen und „erschüttert" die vor ihr liegende Luft.

Ein empfindliches Seismometer

Wir legen den Ohrhörer auf den Tisch und trommeln mit den Fingern auf der Platte. Jede geringe Erschütterung der Tischplatte wird sofort durch Blinken und Kratzen gemeldet. Ein Seismometer ist ein Erdbebenmeßgerät. Geringe Erschütterungen der Erdoberfläche werden damit aufgenommen, gewaltig verstärkt und auf Anzeigeinstrumenten oder Registrierstreifenschreibern dargestellt. Bei einem „echten" Seismometer wird natürlich keine richtige Membran verwendet. Es handelt sich vielmehr um einen an einer Feder aufgehängten Magneten. Die Bewegung des Magneten erzeugt in einer fest angebrachten Spule kleine Spannungen.



Know-how: Rückkopplung: Die Schlange beißt sich in den Schwanz

Je weiter unser elektronisches Ohr (das Mikrofon) von der Schallquelle (dem Lautsprecher) entfernt ist, desto leiser treffen die Schallwellen auf, desto mehr werden sie auf ihrem Weg durch die Luft abgeschwächt. Die Verstärkerkette – Vorverstärker und AMP-Modul, einschließlich Poti – gleicht diese Abschwächung wieder aus. Die Schwingungen setzen ein, wenn die Verstärkung mindestens so groß ist, wie der Betrag der Abschwächung ausmacht.
Die mathematisch elegante Formulierung lautet:

$$V \cdot a \geq 1$$

Verstärkung mal Abschwächung größer oder gleich 1!

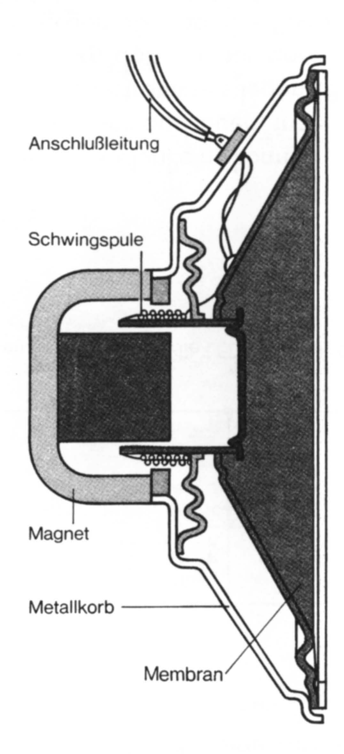


Bild 79. Auch ein Lautsprecher funktioniert elektromagnetisch. Hier ist die Spule direkt auf der Pappmembran angebracht. Der Strom durch die Spule läßt sie mehr oder weniger tief in den Dauermagneten eintauchen. Zwangsläufig muß die Membran dann mitwackeln und die umgebende Luft erschüttern. Bei der Verwendung als Mikrofon werden durch die Bewegung der Spule im Dauermagnetfeld Induktionsspannungen in der Spule erzeugt, die dann von einem Verstärker verstärkt werden können.

Pfeifen durch Rückkopplung

Wir nähern den Ohrhörer vorsichtig dem Lautsprecher bis ein schrilles Pfeifen ertönt. Das Pfeifen kann wieder beseitigt werden, wenn wir die Verstärkung am Poti P1 etwas zurücknehmen. Es ertönt aber erneut, wenn der Hörer dem Lautsprecher weiter genähert wird. Zu jeder Entfernung von Mikrofon (unser zweckentfremdeter Hörer) und Lautsprecher gibt es also eine bestimmte Verstärkungseinstellung, um das Pfeifen anzufachen.

Andersherum: Elektrizität erzeugt Magnetismus

Da ein Lautsprecher aber nicht nur als Mikrofon, sondern eben auch seinem Zweck entsprechend als Lautsprecher benutzt werden kann, und sich das Wirkungsprinzip umkehren läßt, muß auch die Induktion umkehrbar sein. Kann Elektrizität Magnetismus erzeugen? Würden wir eine lose Drahtschaukel in der Nähe eines Magneten plazieren und sie vom Strom durchfließen lassen, so würde der Draht vom Magneten angezogen. Beim Unterbrechen des Stromes wäre alles wieder normal. Offenbar umgibt der fließende Strom den Draht mit einem Magnetfeld (Bild 80), das je nach Richtung (Nordpol-Südpol) entweder vom Magnet angezogen oder abgestoßen wird. Bei einer Spule verstärken sich die kleinen Magnetfeldchen dadurch, daß viele Windungen nebeneinanderliegen.

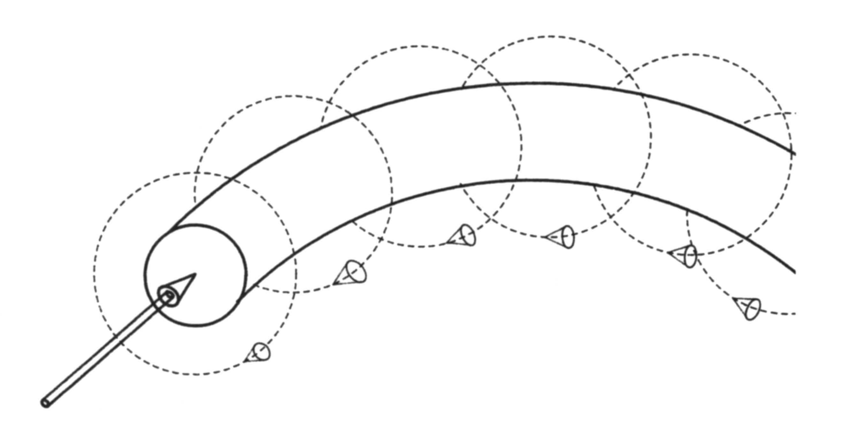
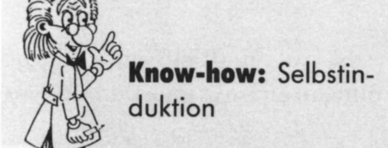


Bild 80. Jeder stromdurchflossene Draht ist von einem Magnetfeld umgeben.



Know-how: Selbstinduktion

Wieso blitzt die Leuchtdiode ausgerechnet beim Ausschalten auf? Von der Batterie kann kein Strom geliefert werden, denn der Taster hat dann den Stromkreis längst unterbrochen. Der Strom muß aus der Spule kommen! Nach dem Einschalten erzeugt der Strom in der Spule ein Magnetfeld. Wenn der Strom unterbrochen wird, fällt das Magnetfeld natürlich sofort in sich zusammen. Aber: War es nicht gerade die Änderung des Magnetfeldes, die die stärksten Wirkungen hervorrief, und ist nicht ein plötzliches Zusammenbrechen eine sehr schnelle Änderung? In der Tat: Das schnell in sich zusammenfallende Magnetfeld (= das sich schnell ändernde) erzeugt in der Spule eine Induktionsspannung. Diese ist der ursprünglichen Spannung entgegengerichtet, so daß die Leuchtdiode nun in Durchlaßrichtung im Stromkreis liegt und dies durch das Aufblitzen anzeigt.

Strom aus, Spannung ein

Im Aufbau 82 lassen wir den Strom über den Taster durch die große Spule der Ferritantenne fließen. Parallel zur Spule schalten wir eine Leuchtdiode. **Aber Achtung! Die Leuchtdiode muß genauso wie gezeichnet in die Schaltung eingesetzt werden, nämlich in Sperrichtung! In Durchlaßrichtung wäre die Diode ohne den Schutz eines Vorwiderstandes an die Batterie geschaltet und würde sofort zerstört werden.** Wenn wir auf den Taster drücken, passiert zunächst nichts Merkwürdiges. Der Strom fließt durch die Spule. Beim Loslassen des Tasters blitzt dagegen die Leuchtdiode kurz auf. Da ohnehin nichts passiert, während Ta1 geschlossen ist, genügt es, den Taster nur kurz zu drücken. Die Batterie wird es uns mit größerer Lebensdauer danken!

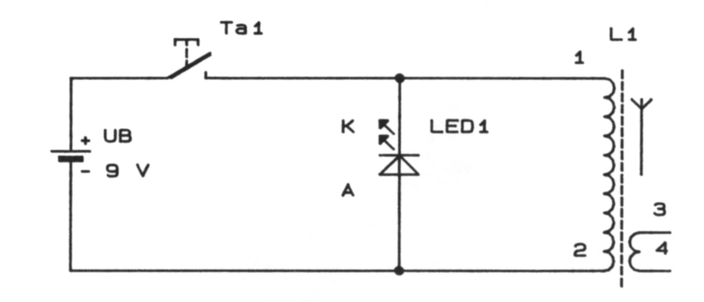


Bild 81. Beim Loslassen der Taste blitzt die LED kurz auf. Offenbar wird der Strom von der Spule geliefert.

Spiel im Dunkeln

Wenn wir das Zimmer abdunkeln, können wir den obigen Versuch sogar noch wesentlich ausbauen, indem wir jetzt die kleine Wicklung in den Batteriestromkreis legen (Bild 84). Dann ist es aber besonders wichtig, daß wir nur ganz kurz auf den Taster drücken! Erwartungsgemäß sind die Selbstinduktionsspannungen jetzt wesentlich kleiner, und das Leuchten der LED ist kaum noch zu erkennen. Falls das Zimmer nicht abgedunkelt werden

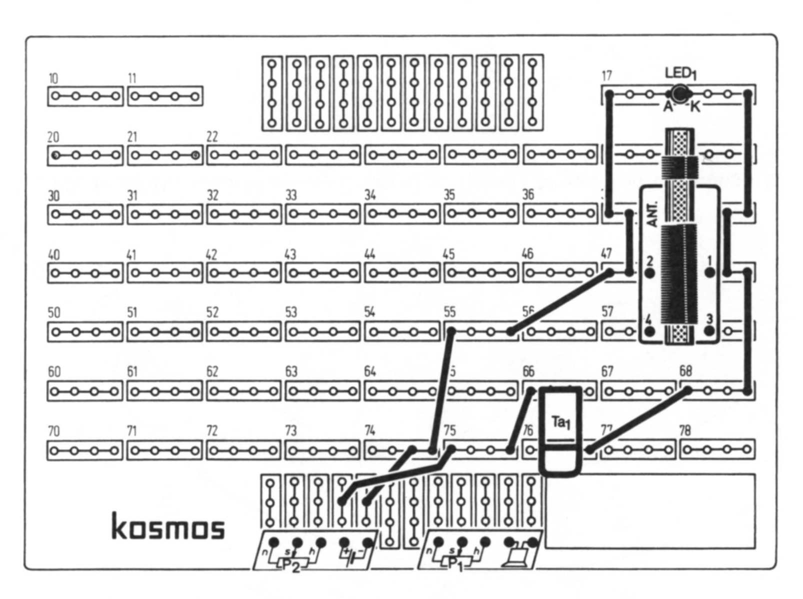


Bild 82. Aufbau zu Schaltung 81.

kann, ist es ratsam, eine Pappröhre über die Leuchtdiode zu schieben und mit dem Auge direkt darüber zu gehen. In den Stromkreis der großen Spule schalten wir LED2. Sofern sie richtig herum eingesteckt ist, blitzt sie jetzt beim Schließen des Stromkreises auf – beim Öffnen blitzt wie beim letzten Experiment LED1. Wir haben also wieder das gewohnte Wechselspiel, daß nur beim Ein- und Ausschalten etwas passiert, bei gleichmäßig fließendem Strom dagegen nichts, diesmal aber magnetisch!

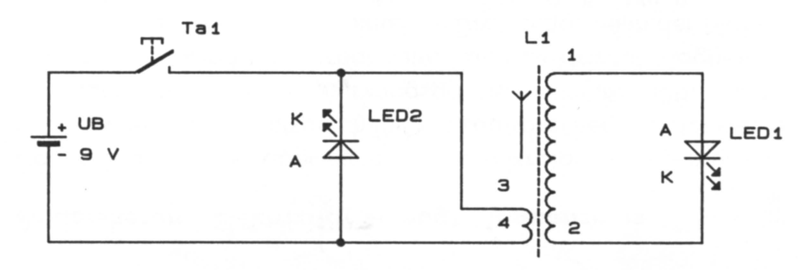


Bild 83. Beim Einschalten blitzt LED1 kurz auf, ohne leitende Verbindung zur Batterie zu haben. Das Loslassen der Taste wird dagegen von LED2 angezeigt.

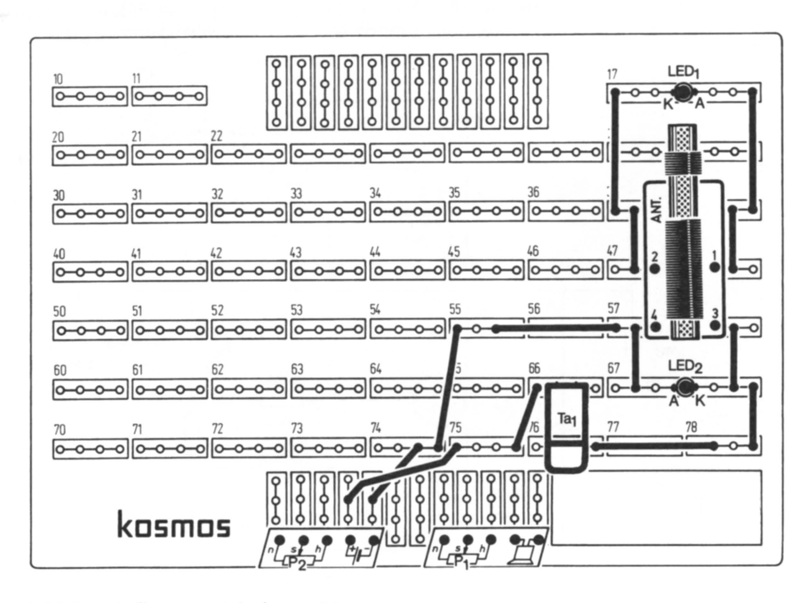


Bild 84. Aufbau zu Schaltung 83.

Magnetisch betätigter Schalter

Wir können Induktionsspannungen auch zum Schalten verwenden. Dazu benötigen wir irgendeinen starken Magneten. Wir schließen die Ferritantenne über den Kondensator C1 an die Basis von T 1 an (Bild 86). Dann drehen wir Poti P2 langsam soweit auf (von Null beginnend), daß die LED gerade verlöscht. Bei schwacher Batterie kann es vorkommen, daß die LED in Dauerblinken übergeht. Dann muß P2 noch weiter aufgedreht werden, bis die Leuchtdiode garantiert dunkel ist. Nun tippen wir mit dem Magneten kurz, aber kräftig an die Stirnseite der Ferritantenne. Sofort blitzt die LED auf und bleibt kurz brennen. Die Schaltung arbeitet umso empfindlicher, je genauer P2 eingestellt ist. Sie schaltet sich wieder selbsttätig für den nächsten Impuls scharf, denn sie funktioniert nach dem Prinzip des monostabilen Multivibrators.

Bild 85. Ein magnetbetätigter Schalter. Die Schaltung stellt einen monostabilen Multivibrator dar, d.h., die Schaltung fällt immer selbsttätig in einen stabilen Ausschaltzustand zurück.

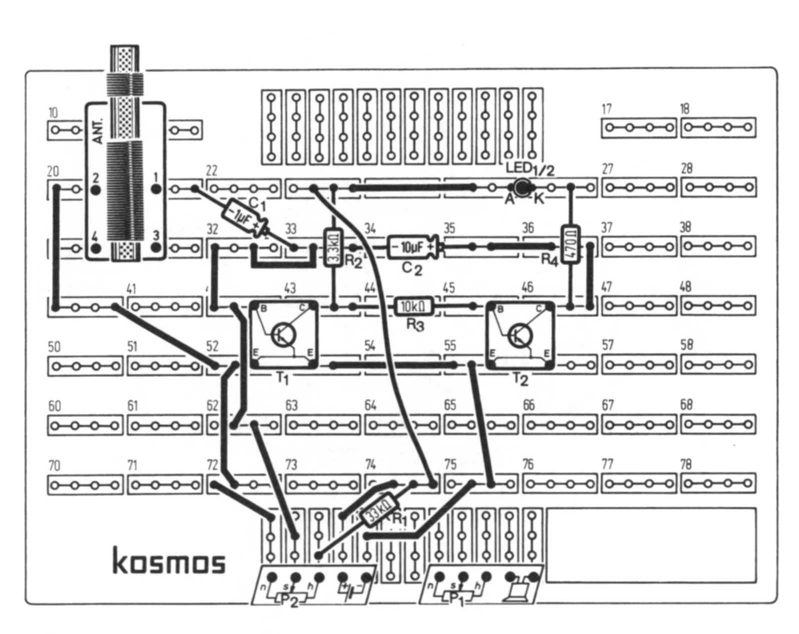


Bild 86. Aufbau zu Schaltung 85.

Zündtransformator: Elektromagnetisch betätigter Schalter

Jetzt wechseln wir die Zustandsform gleich zweimal. Aus elektrischem Strom erzeugen wir ein Magnetfeld, das sich ändernde Magnetfeld erzeugt wiederum eine elektrische Spannung (Bild 88).
Wir laden einen 100-μF-Kondensator auf, indem wir ihn einige Sekunden an die Batterie (Steckfedern 25 und 23) anschließen. Aber bitte richtig herum! Wir können den Kondensator jetzt aus der Schaltung entfernen. Auf seinen Platten ist die elektrische Energie gespeichert, und wir können sie mit uns herumtragen. Anschließend tippen wir seine „Beine" kurz an die Anschlüsse 3 und 4 der Ferritantenne (Steckfedern 26 und 28). Die LED leuchtet auf! Und das, obwohl wir doch vorher festgestellt haben, daß zwischen den Anschlüssen 3 und 4 und den Anschlüssen 1 und 2 keine leitende Verbindung besteht (sollte sie bereits beim Einschalten der Stromversorgung leuchten, so muß der Taster kurz gedrückt werden). Nach jedem Einschaltversuch muß der ursprüngliche Zustand durch Drücken des Tasters Ta1 wieder hergestellt werden, denn es handelt sich hier um einen bistabilen Multivibrator. Nach kurzer Erholzeit kann unser Elko noch weitere Stromstöße abgeben, und wir können den Versuch, ohne nachladen zu müssen, mehrfach wiederholen. Die beiden Stromkreise sind rein induktiv gekoppelt. Der erregende, der primäre Stromkreis, wie wir fachmännisch sagen (also Elko und die kleine Wicklung der Ferritantenne), hat keine leitende Verbindung zum erregten (sekundären) Stromkreis. Nach diesem Prinzip funktionieren die Zündtransformatoren für große Hochspannungsschalter. Man kann damit gefahrlos mit einem kleinen Steuerkontakt enorme Energien (z. B. einen starken Rundfunksender) ein- und ausschalten, ohne befürchten zu müssen, einen elektrischen Schlag zu bekommen.

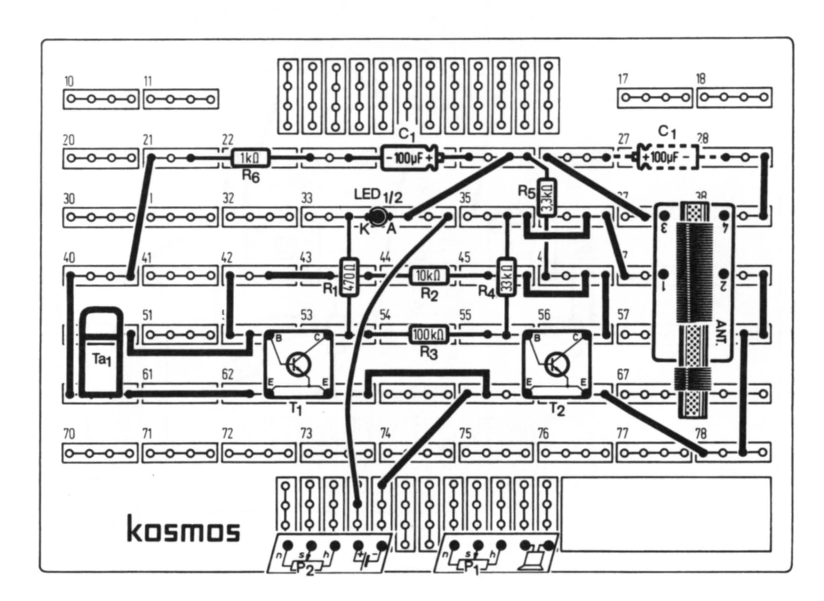


Bild 88. Aufbau zu Schaltung 87.

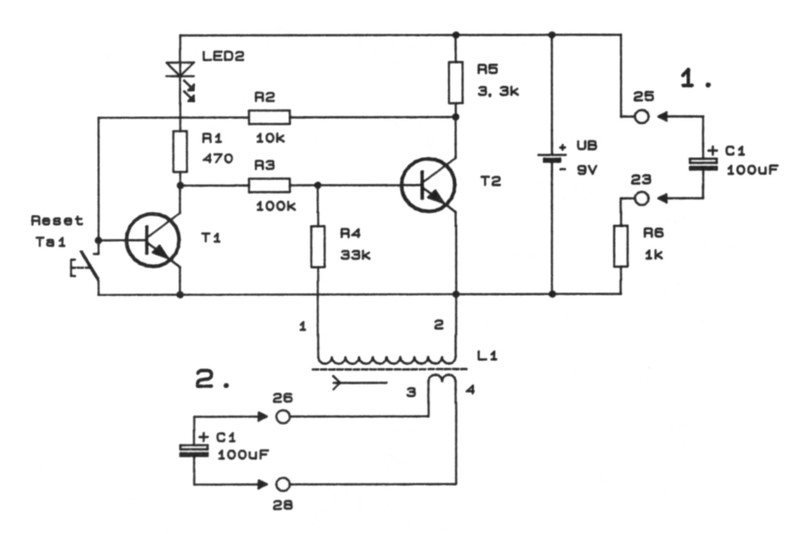


Bild 87. Zündtransformator: Die Ladung des Kondensators C1 genügt, um die Leuchtdiode ohne leitende Verbindung einzuschalten. Die Schaltung stellt einen bistabilen Multivibrator dar, d.h., der erreichte Schaltzustand bleibt dauernd erhalten. Mit der Reset-Taste muß immer wieder der Aus-Zustand hergestellt werden.

Transformator: Auf die Windungen kommt es an

An die Anschlüsse 3 und 4 schließen wir gemäß Bild 90 den Lautsprecherausgang eines Radios oder eines Kassettenrecorders an. Es genügt, nur ganz schwache Lautstärken an diesem Radio einzustellen. Die Tonquelle – das Radio – wird induktiv oder transformatorisch angekoppelt. Bei manchen Radios kann es besser sein, die Ferritantenne umgekehrt zu verwenden, also den Radioausgang an 1 und 2 anzuschließen. Die Lautstärke unseres Abhörverstärkers ändert sich dabei, und zwar im Verhältnis der Windungen zueinander. Wenn die Sekundärwicklung mehr Windungen als die Primärwicklung hat, wird es lauter. Die Spannungen von Primär- und Sekundärwicklung entsprechen dem Verhältnis der Windungszahlen. Also viel Windungen = hohe Spannung.

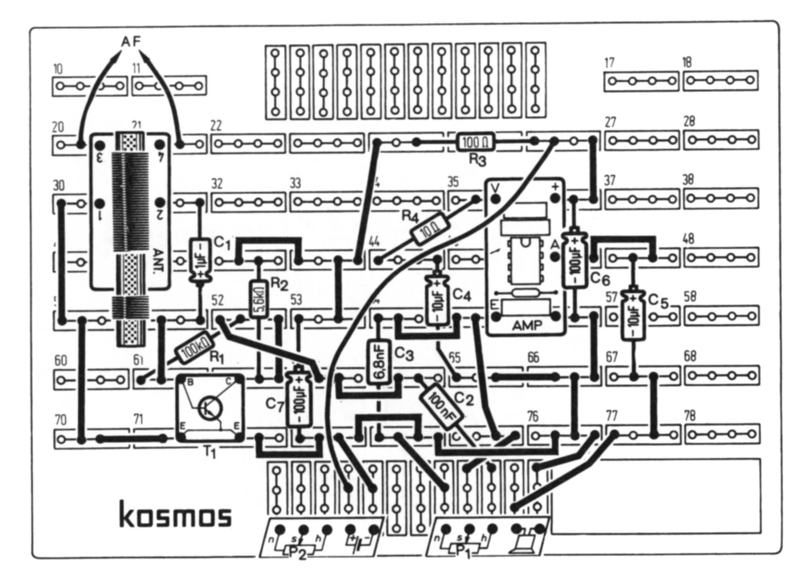


Bild 90. Aufbau zu Schaltung 91.

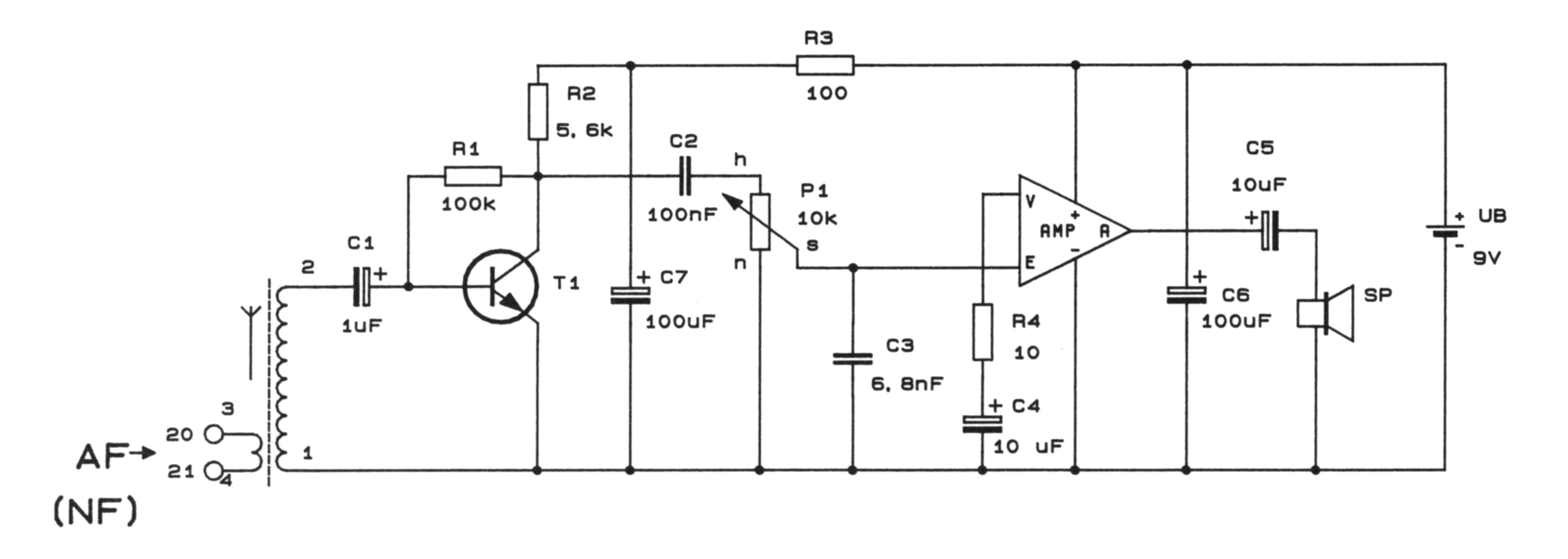
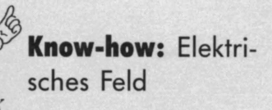


Bild 89. So kann der Lautsprecherverstärker isoliert, also ohne leitende Verbindung, an ein anderes Radio oder einen Cassettenrekorder angeschlossen werden.



Know-how: Elektrisches Feld

Um ein Magnetfeld aufzubauen, muß immer ein Strom fließen. Hier flackert die Leuchtdiode jedoch, ohne daß ein Strom in den Verstärker hineinfließt. Es gibt also noch eine andere Art von Feldern. Erinnern wir uns an die Versuche mit Kondensatoren. Unser Körper stellt gegenüber dem Feldfühler die eine Platte eines Kondensators dar. Durch das Scharren mit den Füßen oder das Reiben mit dem Baumwolltuch laden wir uns elektrostatisch auf. Aufgrund der bereits beschriebenen Fernwirkung werden demzufolge auf der anderen Kondensatorplatte – in unserem Fall der Draht – Elektronen abgezogen. Es fließt also ein winziger Strom (ein Verschiebestrom), der, kräftig verstärkt, die Leuchtdiode zum Flackern bringt.



Bild 91. Anschluß eines handelsüblichen Klinkensteckers zur Zuführung der AF (NF) vom Cassettenrecorder in die Schaltung.

3.3 Elektrisches Feld

In den feinen Salons des Barock waren Experimente mit Elektrisiermaschinen und Sprühfunkenentladungen ein beliebtes Gesellschaftsspiel. Heute wissen wir, daß es sich um die Wirkungen von elektrischen Feldern handelte.

Experimente

Elektronische Geisterbeschwörung

Man kann bereits mit zwei Transistoren einen sehr leistungsfähigen Verstärker aufbauen. Die Schaltung nach Bild 92 (Aufbau 93) wurde nach ihrem Erfinder Darlingtonschaltung genannt. Anstatt ein Eingangssignal anzuschließen, stecken wir an die Basis von T 1 nur ein 15 cm langes Drahtstück, dessen oberes Ende – um Verletzungen zu vermeiden – umgebogen wird (Bild 94). Am eindrucksvollsten gelingt das Experiment, wenn wir Schuhe mit Gummisohlen tragen und es in einem Raum mit Teppichboden durchführen. Wenn wir unsere Hände dem Draht nähern und dabei kräftig mit den Füßen scharren, flackert die Leuchtdiode. Besonders starke Wirkung zeigt sich, wenn wir ein Kunststofflineal mit einem trockenen Baumwolltuch reiben und dann rasch über dem senkrechten Draht bewegen.

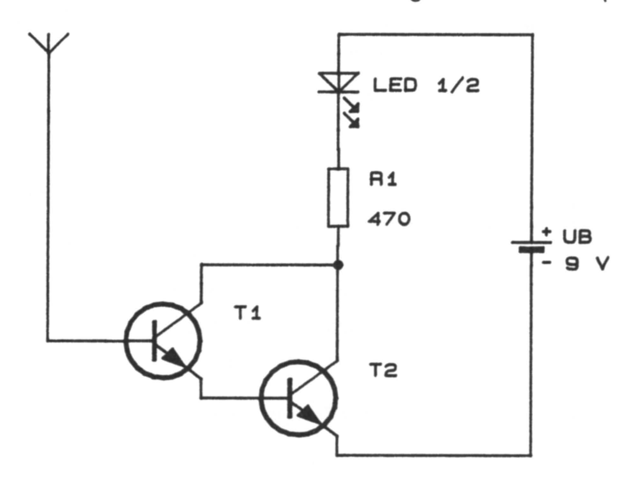


Bild 92. Ein Darlingtonverstärker zum Nachweis elektrischer Felder. Die Leuchtdiode flackert, wenn wir unsere Hand der Antenne nähern.

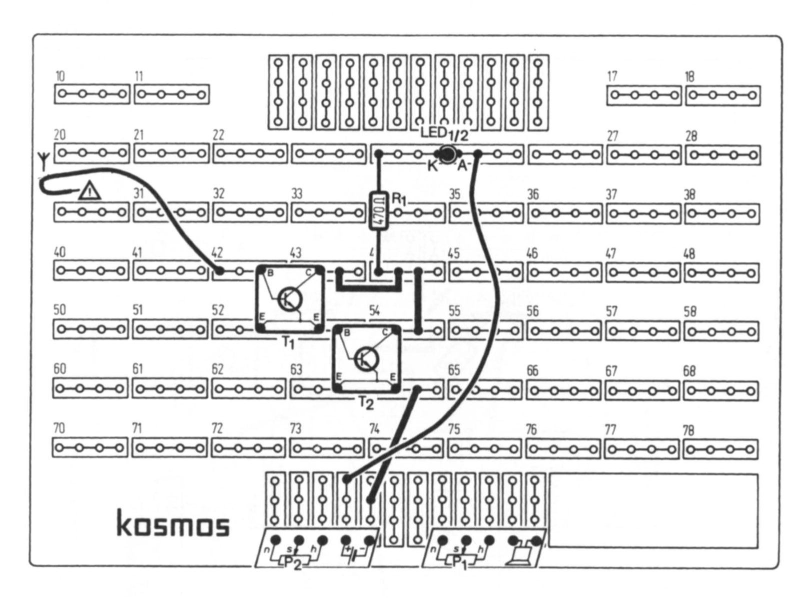


Bild 93. Aufbau zu Schaltung 92.

Know-how: Feldlinien: Nur eine Vorstellung

Da hier ohne Zweifel unsichtbare Kräfte am Werk sind, konstruierten die Physiker ähnlich wie beim Magnetfeld eine Modellvorstellung. Zwischen zwei Orten mit unterschiedlicher Elektronendichte – seien es die Pole der Batterie oder die Platten eines Kondensators – besteht ein elektrisches Feld (Bild 97). Man kann die Wirkung eines elektrischen Feldes durch kleine Papierschnipsel o.ä. zeigen, die sich im Feld ausrichten, das Feld selbst hat natürlich noch niemand gesehen. Ähnlich wie das Magnetfeld greift auch das elektrische Feld nur unwesentlich in den Raum hinaus. Beim Telefonverstärker beispielsweise mußten wir sehr nahe an das Gehäuse des Telefons heran. Schon in geringer Entfernung war die Lautstärke so gering, daß man nichts mehr aufnehmen konnte. Für die Fernübertragung von Nachrichten für Radio und Fernsehen sind sowohl das elektrische als auch

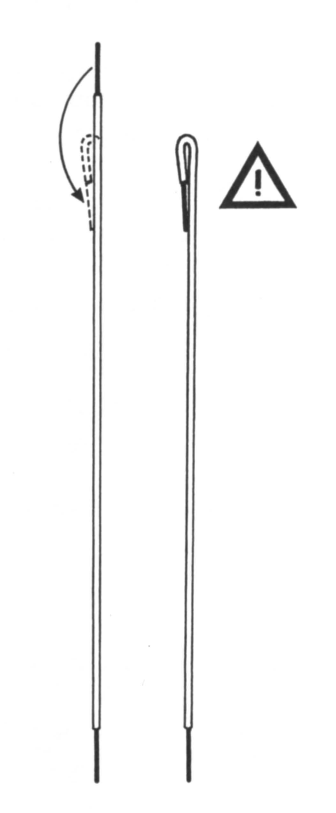


Bild 94. Das kann ins Auge gehen! Deshalb: Bei hochstehenden Drähten das obere Ende umbiegen!

3.4 Elektromagnetisches Wechselfeld

Im Jahre 1873 behauptete der Schotte James Clerk Maxwell, daß es Wellen geben mußte, die weit in den Raum hinausstrahlten. Er ging sogar noch weiter: Er wußte zu berichten, daß auch das Licht und die Wärmestrahlung aus genau diesem „Stoff" waren! Lediglich ausgerüstet mit Bleistift und Papier, machte er eine Entdeckung von so ungeheuerer Tragweite!

Experimente

Wie von selbst: Resonanz!

Wir bauen uns eine Schaukel aus einer großen Briefklammer, die wir gut beweglich an einem gebogenen 15-cm-Drahtstück aufhängen (Bild 98). Wenn wir die Briefklammer leicht anschubsen, schwingt sie mit ihrer Eigenfrequenz ein paarmal hin und her, bis die unvermeidliche Reibung ihre Energie aufgezehrt hat. Damit sie dauernd schwingt, muß sie immer wieder angestoßen werden. Als versierte Elektroniker automatisieren wir natürlich diesen Vorgang: Ein astabiler Multivibrator (Bild 95) schickt kurze Stromimpulse durch die Ferritantenne, die dann durch ebenso kurze magnetische Impulse die Briefklammer zu sich heranzieht, um sie sofort wieder frei schwingen zu lassen. Logischerweise muß die Briefklammer aus Eisendraht bestehen und darf nicht etwa aus Kunststoff sein. Besonders knifflich ist die Einstellung des richtigen Abstandes zur Stirnseite der Ferritantenne (= unseres Elektromagneten). Er darf höchstens 5 mm betragen, weiter reicht die Wirkung des Magnetfeldes nicht! Mit dem Poti P2 kann die Frequenz des Multivibrators geändert werden. Wir stellen es

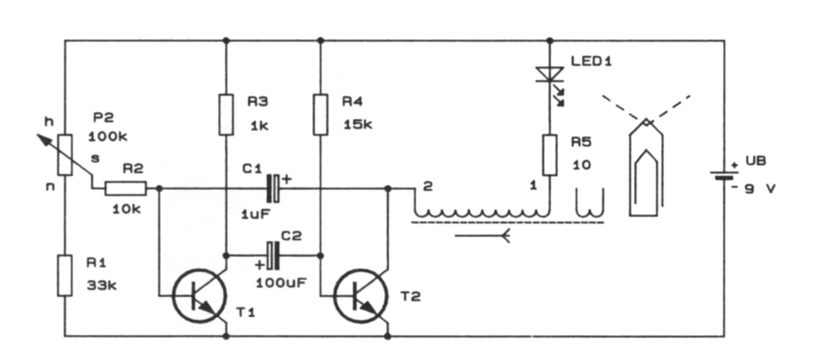


Bild 95. Der astabile Multivibrator schickt kurze Stromimpulse durch die Spule der Ferritantenne. Dadurch wird die frei aufgehängte Briefklammer zum Schwingen angeregt. Wenn die erregende Frequenz des Multivibrators mit der Eigenfrequenz der Briefklammer übereinstimmt, ergeben sich besonders weite Ausschläge: Resonanzfrequenz.

das magnetische Feld eigentlich unbrauchbar. Aber die Lösung liegt in der Kombination der beiden.

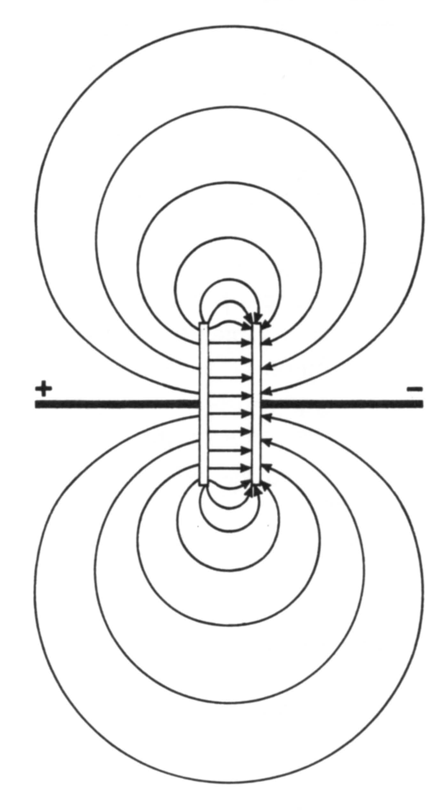


Bild 96. Feldlinien sind nur eine Hilfsvorstellung. Sie sollen die Stärke des elektrischen Feldes zeigen. Das Feld ist innerhalb des Kondensators am stärksten. Aber einige Feldlinien verirren sich auch außerhalb.

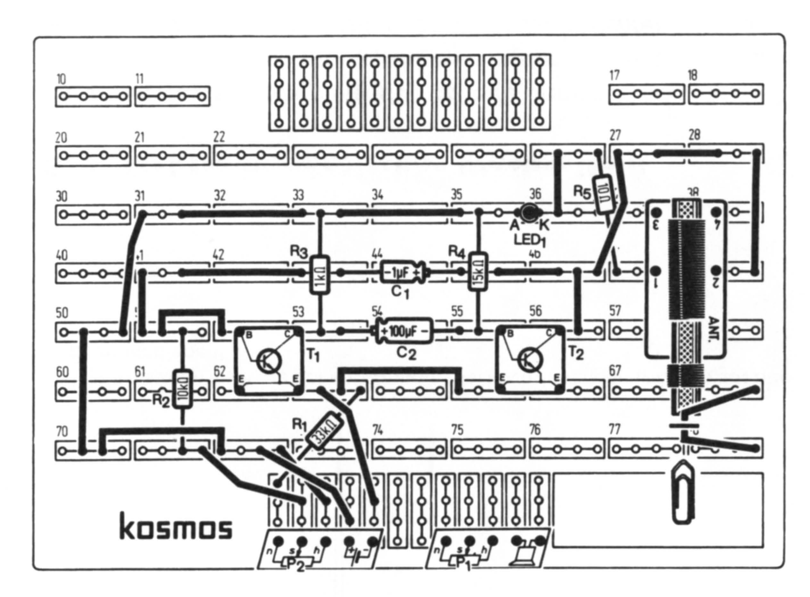


Bild 97. Aufbau zu Schaltung 95.

auf etwa „2" ein und beobachten, ob die Briefklammer im Takt des Blinkens der Leuchtdiode leicht anschwingt. Falls sie sich gar nicht bewegt, muß der Abstand noch etwas verkleinert werden. Nun drehen wir P2 etwas weiter auf und warten nach jeder Veränderung des Potis das Einschwingen des Pendels ab. Etwa in Stellung „3...4" stimmt die Frequenz des Multivibrators mit der mechanischen Eigenfrequenz der Briefklammerschaukel überein. Sie führt dabei die weitesten Schwingungen aus. Multivibrator und Schaukel befinden sich in Resonanz. Bei höheren Multivibratorfrequenzen nimmt die Schwingungsweite (die Amplitude) wieder ab.

Tip zum einfacheren Auffinden der Resonanzfrequenz: Briefklammer mit der Hand anstoßen und Poti P2 so einstellen, daß die LED immer dann aufleuchtet, wenn die Schaukel zur Ferritantenne hin schwingt.

Besonders geschickten Experimentatoren kann auch das Anregen des Pendels mit der halben Schwingungszahl der Eigenfrequenz gelingen.

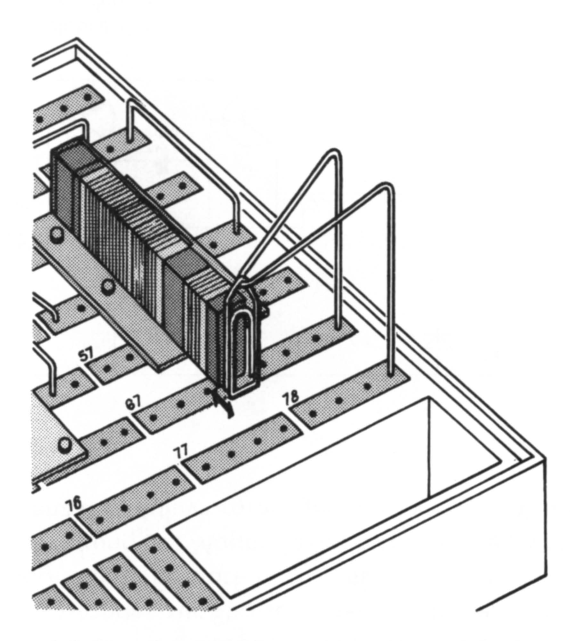


Bild 98. So wird die Büroklammmer freischwingend an einem langen Drahtstück aufgehängt.

Die Fachwelt nahm die Maxwellsche Theorie zur Kenntnis. Heinrich Hertz, Professor in Karlsruhe, war besonders von ihr angetan. Er sprach von „einem kühnen Gedankengebäude von einzigartiger Schönheit". Prof. Hertz aber war nicht nur ein brillanter Mathematiker, sondern auch ein genialer Experimentator.

HF: Geschwindigkeit ist keine Hexerei!

Löst sich das elektromagnetische Feld von jedem stromdurchflossenen Draht ab? Wird jeder Draht automatisch auch zur Antenne? „Im Prinzip ja", würde Radio Eriwan sagen, „wenn auch mit unterschiedlichem Erfolg!"

Was aber fördert, was hemmt die Abstrahlung in den Raum? Natürlich ist es eine Binsenweisheit, daß starke Ströme und hohe Spannungen auch starke elektromagnetische Felder zur Folge haben. Aber es kommt auf die Änderungsgeschwindigkeit von Strom und Spannung an. Je schneller sie sich ändern, desto mehr



Know-how: Schwingkreis: Schaukel für Elektronen

Fassen wir unser Wissen bis hierher einmal kurz zusammen. Die Änderung des Magnetfeldes bewirkte eine Spannung in der Spule. Mit einer Spannung kann man einen Kondensator aufladen. Ein geladener Kondensator ist wiederum in der Lage, einen Strom durch eine Spule fließen zu lassen. Dabei wird er entladen, und das elektrische Feld bricht zusammen. Der Strom baut erneut ein Magnetfeld in der Spule auf. Das durch Nachlassen des Stromes zusammenbrechende Magnetfeld erzeugt erneut einen Strom, der den Kondensator wieder umgekehrt auflädt usw. Ein Zustand lebt also immer vom Zusammenbrechen des anderen. Die Energie schaukelt ständig zwischen einem elektrischen Feld und einem magnetischen Feld hin und her. Maxwell formulierte genau diesen Zusammenhang in seinen berühmt gewordenen Formeln – den

hinken die Feldlinien am Draht denen im Raum hinterher, desto stärker schnüren sie sich ein und lösen sich ab. Die Änderungsgeschwindigkeit ist umso höher, je höher die Frequenz des erregenden Wechselstromes ist. Daher der Name Hochfrequenz, meist kurz „HF" genannt. International ist aber die Abkürzung RF für „Radio Frequency" gebräuchlicher.

3.5 Spektrum der elektromagnetischen Wellen

Bisher haben wir immer so getan, als wären elektromagnetische Wellen etwas Künstliches, nur vom Menschen erzeugt. In Wirklichkeit sind sie jedoch ein alter Hut. Längst bevor es Menschen, ja längst bevor es Leben gab, gab es elektromagnetische Strahlung. Sie ist eine Eigenschaft der Materie des Weltalls. Diese Wellen haben ohne uns und vor uns existiert. Die Entdeckungen von James Clerk Maxwell und Heinrich Hertz bedeuten lediglich, daß uns die Existenz der Wellen bewußt wurde. Die Materie des Weltalls, auch die der Erde und auch wir selbst strahlen elektromagnetische Energie ab. Die Sonne spendet in erster Linie Wärme und Licht. Aus den Tiefen des Weltalls kommt harte Röntgenstrahlung und kosmische Strahlung zu uns usw. Aber die Wellenlängen dieser Wellen sind wesentlich kürzer als die, die wir technisch ausnutzen. Das gesamte Spektrum der elektromagnetischen Wellen ist gigantisch groß:

Frequenz	Wellenlänge	Bezeichnung		Anwendung
1 Hz –	– 300000 km	Niederfrequenz	VLF	Technischer Wechelstrom
10 Hz –	– 30000 km			
100 Hz –	– 3000 km			
1 kHz –	– 300 km			Audiotechnik
10 kHz –	– 30 km			Telefonie
100 kHz –	– 3 km	Langwellen	LF	U-Boot-Funk
1 MHz –	– 300 m	Mittelwellen	MF	Rundfunk
10 MHz –	– 30 m	Kurzwellen	HF	
100 MHz –	– 3 m	Ultrakurzwellen	VHF	Fernsehen
1 GHz –	– 30 cm	Dezimeterwellen	UHF	Radar
10 GHz –	– 3 cm	Zentimeterwellen	SHF	Richtfunk
100 GHz –	– 3 mm	Millimeterwellen	EHF	Satellitenfunk
1 THz –	– 300 µm	Mikrometerwellen		Quasioptische Wellen
10 THz –	– 30 µm	Infrarot		
100 THz –	– 3 µm			Wärmestrahlung
10^{15} Hz –	– 300 nm	Ultrviolett		← Sichtbares Licht
10^{16} Hz –	– 30 nm			Spektroskopie
10^{17} Hz –	– 3 nm	Röntgenstrahlung		
10^{18} Hz –	– 300 pm			Medizin Werkstoffprüfung
10^{19} Hz –	– 30 pm			
10^{20} Hz –	– 3 pm	Gammastrahlung		
10^{21} Hz –	– 300 fm			
10^{22} Hz –	– 30 fm	Höhenstrahlung		Atomphysik

In Bild 99 haben wir versucht, einen Überblick über die Vielfalt der elektromagnetischen Strahlung zu geben. Um überhaupt den längerwelligen Bereich, eben den Bereich für Rundfunk- und Fernsehwellen, darstellen zu können, mußten wir einen logarithmischen Maßstab wählen. In normaler (linearer) Darstellung wäre in diesem Diagramm der gesamte Bereich, der längerwellig als Röntgenstrahlung ist – also auch Licht- und Radiowellen -, nur noch als schmaler Strich am oberen Bildrand darstellbar gewesen. Man muß sich vorstellen, daß jeder Bereich in unserem Bild jeweils 10 seiner Vorgänger „aufnehmen" könnte. In den Kurzwellenbereich z.B. passen 10mal soviel Sender wie in den Mittelwellenbereich. In den UKW-Bereich paßt wiederum der Kurzwellenbereich 10mal hinein usw. Wenn man diese Vorstellung weiter bis in den Höhenstrahlungsbereich – die kürzesten uns bekann-

Maxwellschen Gleichungen. Die Energie schwingt in einem Schwingkreis – das ist die Zusammenschaltung von Spule und Kondensator – genauso zwischen zwei Zuständen hin und her wie die Masse eines Uhrpendels. Beim Pendel lösen sich Bewegungsenergie und ruhende Energie einander ab. Die Frequenz – also die Häufigkeit des Hin- und Herschwingens – wird beim Uhrpendel nur von der Pendellänge bestimmt. Beim Schwingkreis bestimmen sowohl die Größe des Kondensators als auch die der Spule die Frequenz des Hin- und Herschwingens. Wenn das Pendel aus der Ruhelage ausgelenkt wird, ist in ihm mechanische (potentielle) Energie gespeichert, denn es will in die Ruhelage zurückpendeln. Einmal losgelassen, bleibt es aber nicht dort stehen, sondern schwingt darüber hinaus. Die potentielle Energie wird nämlich in Bewegungsenergie umgesetzt. Im gleichen Maß, wie die Bewegungsenergie durch das Hinaufschwingen aufgezehrt wird, wird sie wieder in potentielle Energie umgewandelt. Man könnte also auch sagen, daß die mechani-

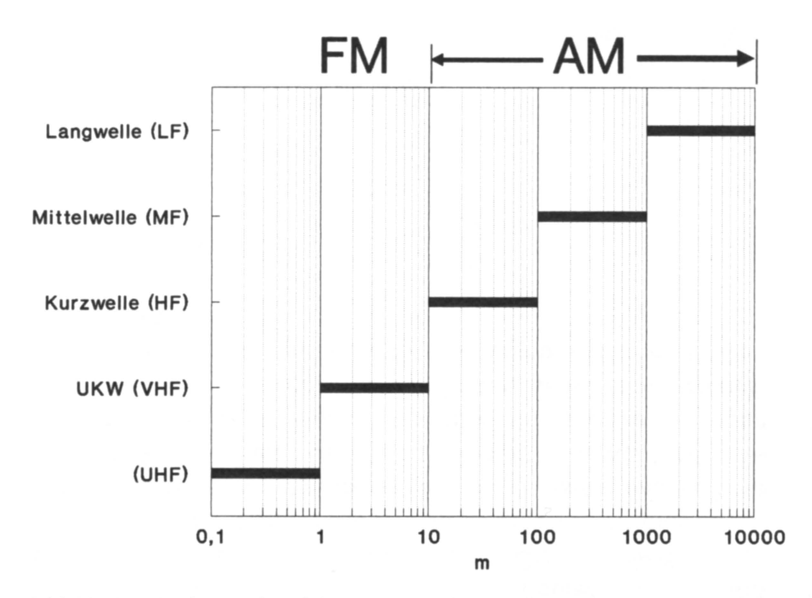


Bild 99. Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen.

ten Wellen – fortzusetzen versucht, erahnt man die gigantische Weite des Spektrums. Man sieht, daß wir für unsere technischen Anwendungen nur den längerwelligen Bereich benutzen, also den Bereich mit den niedrigsten Frequenzen. Und ausgerechnet ihn nennen wir „Hoch"frequenz. Im Vergleich mit der natürlichen Strahlung könnte man ihn höchstens als Schneckenpost bezeichnen. Nun ist es aber so, daß sich nicht alle Wellen auf die gleiche Art und Weise ausbreiten. Wir wissen z.B., daß das Sonnenlicht sich bereits von dünnen Wolken aufhalten läßt. Auch ein heruntergelassener Rolladen aus Kunststoff sperrt das Licht aus, nicht aber die Radiowellen. Ein einfaches Metallgitter dagegen spendet kaum Schatten, für Radiowellen aber ist es undurchdringlich. Und auch die Radiowellen breiten sich auf verschiedene Art und Weise, je nach Wellenlänge, aus. Grob unterscheidet man den AM- von dem FM-Bereich, wie es auf jedem einfachen Radio aufgedruckt ist. Der AM-Bereich umfaßt den LW-, MW- und KW-Bereich, während mit FM der UKW-Bereich gemeint ist.

3.6 Wellenausbreitung

Obwohl Heinrich Hertz bereits mit äußerst kurzen Wellen experimentierte, benutzte man zur praktischen Nachrichtenübertragung zunächst die Langwellen. Der Grund dafür ist die Tatsache, daß die höheren Frequenzen auf ihrem Weg entlang der Erdoberfläche wesentlich stärker gedämpft werden.

LW: Der Kugel angepaßt

Als Langwellen, international LF (für „Low Frequency") abgekürzt, bezeichnet man den Bereich von 1000 bis 10000 m Wellenlänge. Hinreichend starke Sender vorausgesetzt, kann man auf Langwelle beinahe jeden Punkt auf der Erde erreichen. Langwellen breiten sich vorwiegend entlang der Erdoberfläche aus und passen sich dabei der Erdkrümmung an, so daß am Empfangsort zu jeder Zeit der jeweilige Sender mit der gleichen Lautstärke ohne Schwunderscheinungen zu hören ist (Bild 100). Kein Wunder also, daß man zur professionellen Nachrichtenübertragung in der Frühzeit des Funks die LW bevorzugte. Bereits auf Mittelwellen, also den nächstkürzeren Wellen, sind in den Abend- und Nachtstunden die Feldstärken wesentlich instabiler. Bei Wellenlängen unter 300 m ist die Reichweite sogar nur auf maximal einige hundert km begrenzt, und man gab diesen Wellenlängenbereich als allgemeine Spielwiese für naturwissenschaftlich interessierte Enthusiasten, Funkamateure, wie wir heute sagen würden, frei.

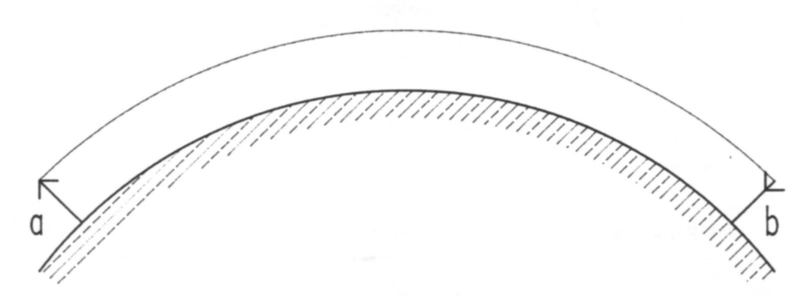


Bild 100. Langwellen breiten sich entlang der Erdoberfläche aus. a: Sender, b: Empfänger.

sche Energie zwischen potentieller und Bewegungsenergie hin- und herschwingt. Das Pendel der Uhr würde nicht ewig weiterschwingen, sondern es bleibt stehen, wenn die mechanische Energie durch Reibung aufgezehrt ist. Bis dahin wird die Schwingweite (die Amplitude) des Pendels immer geringer. Die Schwingung ist gedämpft. Auch bei unserem elektrischen Pendel – dem Schwingkreis – wird die Amplitude (die Stromstärke in der Spule bzw. die Spannung am Kondensator) durch den Spulenwiderstand immer kleiner, bis die gesamte elektrische Energie aufgezehrt ist.



Know-how: Antenne: Ein offener Schwingkreis

Heinrich Hertz benutzte zwei durch einen Draht verbundene Kondensatorplatten. Man kann sich diese Anordnung als offenen Schwingkreis vorstellen (Bild 102).

MW und KW: Auf Umwegen zum Ziel

Das allgemeine Erstaunen war groß, als amerikanische und französische Funkamateure im Jahre 1923 auf einer Wellenlänge von 110 m den Atlantik mit geradezu lächerlichen Sendeleistungen überbrückten. Die starken Schwunderscheinungen wiesen jedoch darauf hin, daß es sich nicht um eine „reguläre" Wellenausbreitung handeln konnte. Es mußte sich um irgend einen bis dato unbekannten Effekt handeln. In der Tat wurde bei den Kurzwellenübertragungen festgestellt, daß es Gebiete gab, in denen kein Empfang möglich war – sogenannte tote Zonen – und Gebiete, in wesentlich größerer Entfernung, in denen die Sender wieder gut zu hören waren. Wesentlich besser jedenfalls, als dies nach theoretischen Berechnungen des Feldstärkeverlaufs möglich sein sollte.

UKW und kürzer: geradewegs wie Licht

Unterhalb etwa 10 m Wellenlänge spielt die klassische Bodenwelle keine Rolle mehr. Dafür werden die Antennen immer handlicher und der Aufbau von stark bündelnden Antennen immer einfacher. Man denke nur an die Parabolspiegel für das Satellitenfernsehen, die wie ein Autoscheinwerfer funktionieren. Allerdings ist die Ausbreitung normalerweise nur auf die optische Sicht begrenzt. Um eine möglichst große Reichweite zu erzielen, baut man UKW-Rundfunksender deshalb auf hohe Berge. Denn hinter dem Horizont verläßt der Strahl die Erdoberfläche und tritt in den Raum hinaus. Und keine Ionosphäre hindert ihn daran; sie wird glatt durchschlagen! Nur deshalb ist auch die Funkverbindung zu Satelliten und Raumschiffen möglich (Bild 101). Oberhalb des UKW-Bereichs ist Platz für besonders „frequenzverbrauchende" Sender. Hier arbeiten die Fernsehsender. Ein Fernsehsender benötigt nämlich mehr Bandbreite als 600 AM-Rundfunksender zusammen! Die internationale Bezeichnung für UKW ist Very High Frequency (VHF).

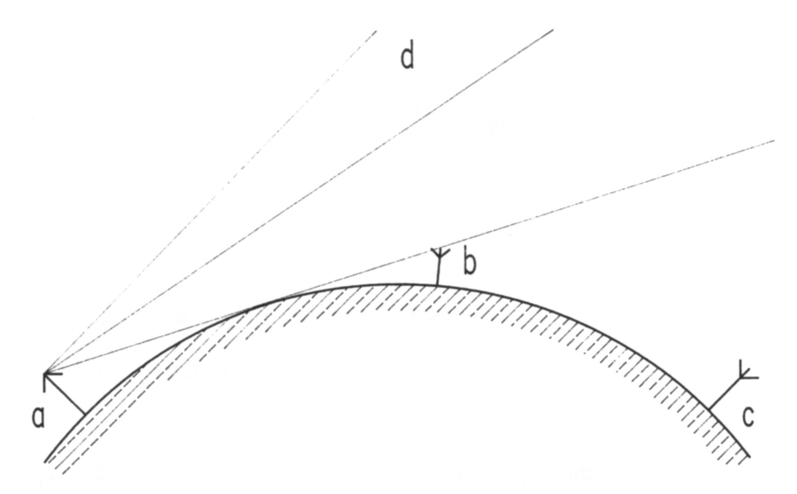


Bild 101. UKW-Verbindungen sind auf die optische Sichtweite beschränkt. Der Empfänger b kann die Aussendungen des Senders a gerade noch empfangen. Der Empfänger c liegt bereits im Funkschatten. Da UKW-Wellen locker in den Weltraum pusten, werden sie zur Verbindung mit Satelliten und Raumschiffen benutzt (d).

4. Ganze Sache: Halbleiter

Rundfunkempfänger und bis auf Hochleistungsendstufen auch die Sender sind heute ausschließlich aus Transistoren, Dioden und integrierten Schaltungen aufgebaut. Man bezeichnet diese Bauteile auch mit dem Sammelbegriff Halbleiter. Dieser Begriff, so üblich er auch geworden ist, ist leider sehr mißverständlich. Halbleiter, das sind Stoffe, die nur halbgut leiten. Schlechter als Metalldrähte, aber besser als Porzellanisolatoren. Auch Kohle und nasses Holz sind Halbleiter. Aber leider völlig unbrauchbar zur Herstellung von Transistoren und IC. Dafür braucht man Stoffe, die in ihrer Leitfähigkeit genau dosierbar sind. Am besten geht das mit Sand! Dazu macht man den Sand völlig (d.h. unvorstellbar gut) sauber und erhält reines Silizium. Das ist aber leider ein

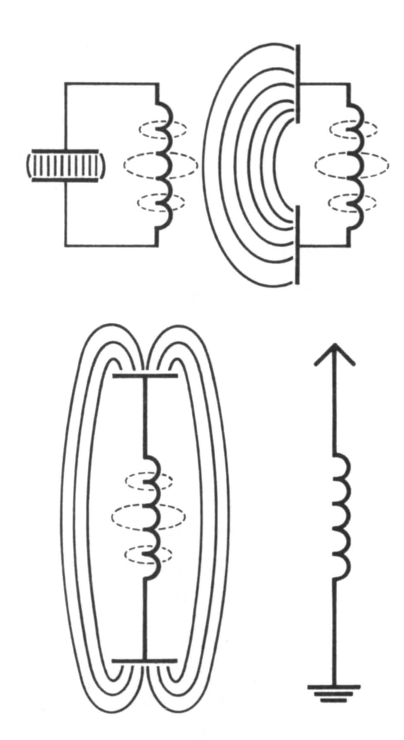


Bild 102. Offener Schwingkreis. Eine Antenne hat genauso Resonanz wie ein Schwingkreis! Nur ist sie so konstruiert, daß ihre Felder weit in den Raum hineinreichen. Man kann sie sich als geöffneten Schwingkreis vorstellen.

Es müssen also dieselben Gesetzmäßigkeiten wie im geschlossenen Schwingkreis herrschen. Aber jetzt passiert etwas ganz Erstaunliches (Bild 105): Die Felder lösen sich von dem offenen Schwingkreis, der Antenne, ab! Der Grund dafür ist, daß die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Felder im Raum ei-

totaler Isolator, absolut nichtleitend! Um jetzt wieder etwas mit dem hochreinen Silizium anfangen zu können, muß man es wieder verunreinigen. Rein in die Kartoffeln – raus aus den Kartoffeln. Man verunreinigt (man dotiert) gerade nur soviel, daß der Grundstoff – das Substrat – eine genau definierte Leitfähigkeit aufweist. Hochohmig genug, um keinen Kurzschluß und niederohmig genug, um keine Unterbrechung darzustellen. Die gezielte Dotierung, also das Hinzufügen eines anderen Materials, bewirkt entweder, daß zusätzliche freie Elektronen in den Stoff hineingebracht werden oder daß an bestimmten Stellen sogar noch Elektronen fehlen. Im ersten Fall, wenn also mehr Elektronen vorhanden sind, also die negativen Ladungsträger sich in der Überzahl befinden, spricht man von n-Material. Wenn dagegen Elektronen fehlen, also „Löcher" vorhanden sind, spricht man von p-Material. Wenn an einen solchen Halbleiter eine Spannung angelegt wird, so fühlen sich die freien Elektronen natürlich vom Pluspol der Batterie angezogen und wandern in dessen Richtung. Die im Stoff vorhandenen Fehlstellen, die Löcher, scheinen dann genau entgegengesetzt zum Minuspol der Batterie zu wandern.

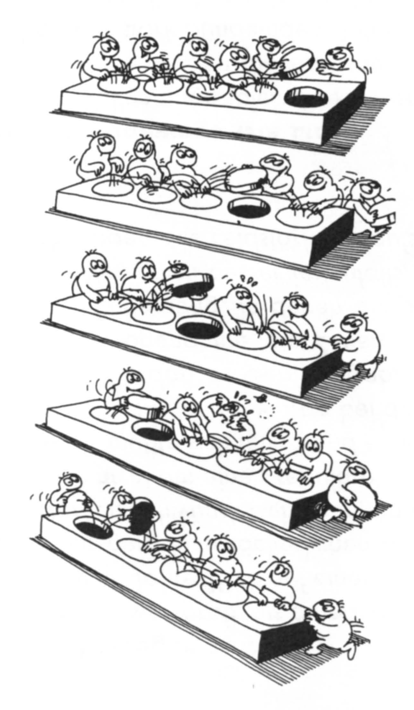


Bild 103. Wenn Elektronen von links nach rechts wandern, scheint sich das Loch in entgegengesetzter Richtung zu bewegen.

4.1 Transistoren: Zwei Dioden in einem Gehäuse

So ein Transistor ist eigentlich nichts anderes als zwei gegeneinander geschaltete Dioden. Bild 111 zeigt das Dioden-Ersatzschaltbild eines Transistors. Da die beiden p-leitenden Schichten der Dioden zusammengeschaltet sind, kann man sich eine Schicht ersparen und setzt die beiden n-leitenden Schichten direkt auf die eine p-Schicht. Daher leitet sich die Bezeichnung von Transistoren, ab. Die Schichtenfolge ist n – p – n. Natürlich gibt es auch pnp-Transistoren, auf deren Erklärung wir hier verzichten wollen, denn sie funktionieren genau wie npn-Transistoren mit dem einen kleinen Unterschied, daß man sie andersherum an die Betriebsspannung anschließen muß.

Experimente

Welcher Anschluß ist die Basis?

Zum Beweis dafür, daß das Diodenmodell des Transistors stimmt, bauen wir uns einen Durchgangsprüfer mit Batterie, Leuchtdiode

Bild 104. Man kann sich einen Transistor auch aus zwei Dioden zusammengesetzt denken.

nen winzigen Betrag größer ist als die Änderungsgeschwindigkeit der Spannung (oder des Stromes) im Antennendraht.

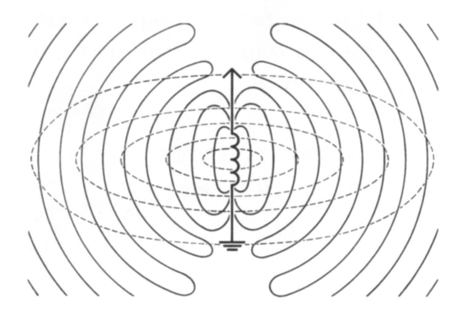


Bild 105. Die Felder bewegen sich im freien Raum ein bißchen schneller als die sie hervorrufenden Ströme und Spannungen im Antennendraht. Der Geschwindigkeitsunterschied und damit die Bereitwilligkeit zum Ablösen ist umso größer, je höher die Frequenz ist.

Der Teil der Feldlinien (stellt Euch Gummibänder vor), der sich unmittelbar am Draht befindet, hinkt dem sich frei im Raum bewegenden Teil hinterher. Infolgedessen schnürt sich das Feld an der Antenne ein, löst sich wie Seifenblasen ab und wandert in den Raum hinaus.

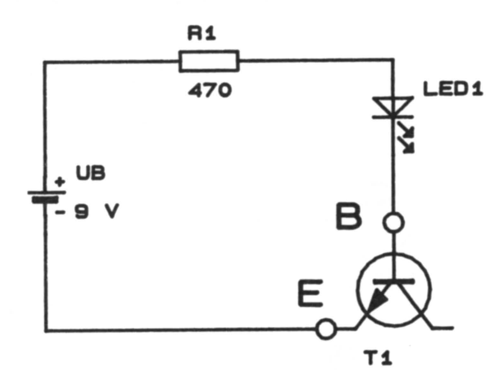


Bild 106. Auch die Basis-Emitter-Strecke ist nur eine Diode. LED1 zeigt dies durch Leuchten an.

und Vorwiderstand auf. Wir tun so, als wüßten wir die Anschlußbezeichnung unseres Transistors nicht und müßten sie erst herausfinden. Dies kommt immer wieder vor, wenn wir z.B. aus einem alten Radio unbekannte Transistoren ausgeschlachtet haben und sie auf Funktion prüfen wollen (Bilder 107 und 110). Durch abwechselndes Untersuchen von je 2 Transistoranschlüssen findet man einen Anschluß, von dem aus zu beiden anderen Anschlüssen Strom fließt. Dieses Bein ist die Basis! Wenn wir an unserem Durchgangsprüfer die Spannungsversorgung umpolen, darf von dem gefundenen Basisanschluß zu keinem anderen ein Strom fließen. Aufmerksame Leser werden aber jetzt mißtrauisch werden. Bisher hatten wir immer streng darauf geachtet, daß man Kollektor und Emitter nicht vertauscht. Nach unserem Diodenmodell müßte das aber doch möglich sein. Hat unser Modell also seine Grenzen? Es hat! Aber es bleibt trotzdem hilfreich, denn ein Transistor funktioniert auch mit vertauschten Kollektor-Emitter-Anschlüssen — allerdings nicht so gut. Nun arbeitet ein Transistor nach der Devise: Ein Strömchen strömt nie allein (denken wir an unser Schleusenmodell). Im Klartext: Wenn über eine (Transistor)-Diode in Durchlaßrichtung (z.B. Basis nach Emitter) ein kleines Steuerströmchen fließt, so fließt „aus Sympathie" dazu auch ein bedeutend stärkerer Strom durch die in Sperrichtung gepolte Diode (über den Kollektor durch die Basiszone zum Emitter).

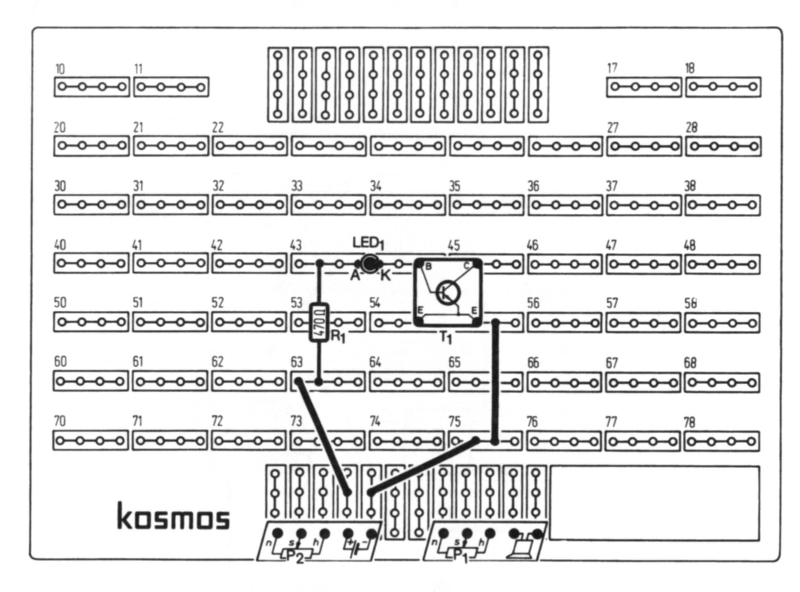


Bild 107. Aufbau zu Schaltung 106.

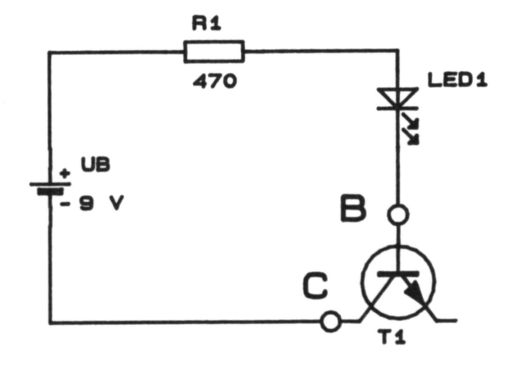


Bild 108. Auch über die Basis-Kollektor-Diode kann Strom fließen.

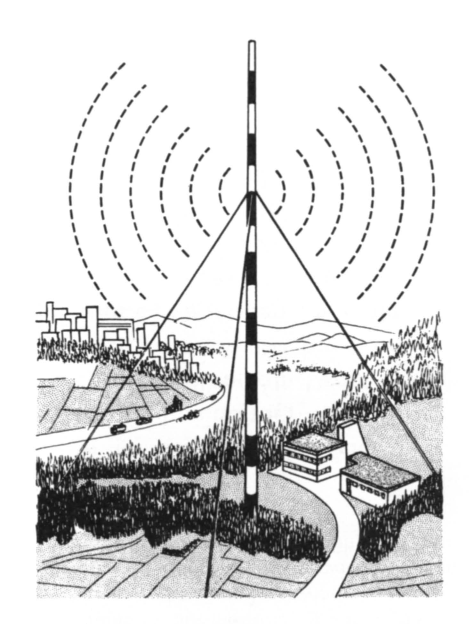


Bild 109. Ein selbstschwingender Sendemast.

Know-how: Wellenlänge und Frequenz

Eine Welle breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit (man erkennt die Verwandtschaft) im Raum aus. Deshalb ist sie in einer Sekunde um 300 000 km weitergerast. Es passen also auf die Strecke von 300 000 km genausoviel Wellen mit Wellental und Wellenberg, wie die Frequenz des erzeugenden Wechselstromes angibt (Bild 113).

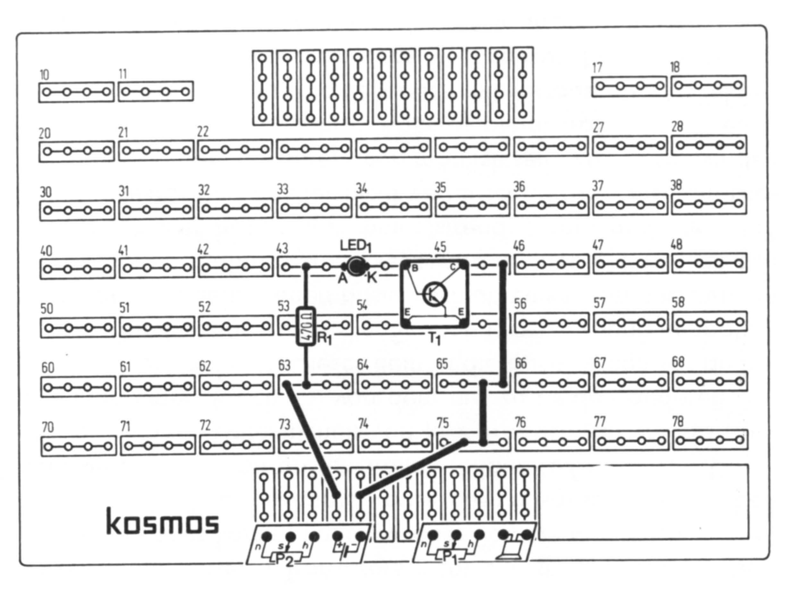


Bild 110. Aufbau zu Schaltung 108.

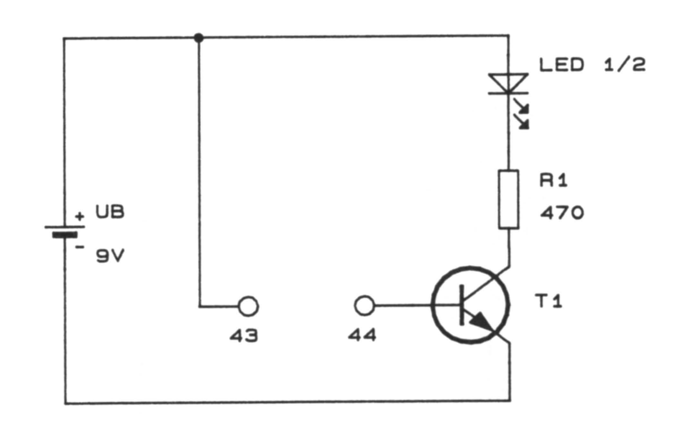


Bild 111. Transistortest mit Finger.

Der Transistortest entlarvt Kollektor und Emitter

Wir bauen die Testschaltung nach Bild 112 auf. In bereits gewohnter Weise führen wir der Basis den Steuerstrom über den hohen Widerstand unserer Fingerspitze zu. Sofern Kollektor und Emitter richtig herum angeschlossen sind, leuchtet die LED hell auf. Wenn wir dagegen Kollektor und Emitter vertauschen (gestrichelte Transistor-Position in Bild 112), brennt sie meist gar nicht, und wir müssen einen „echten" Widerstand (R2) zu Hilfe nehmen. Die Stromverstärkung ist also „verkehrt herum" wesentlich geringer.

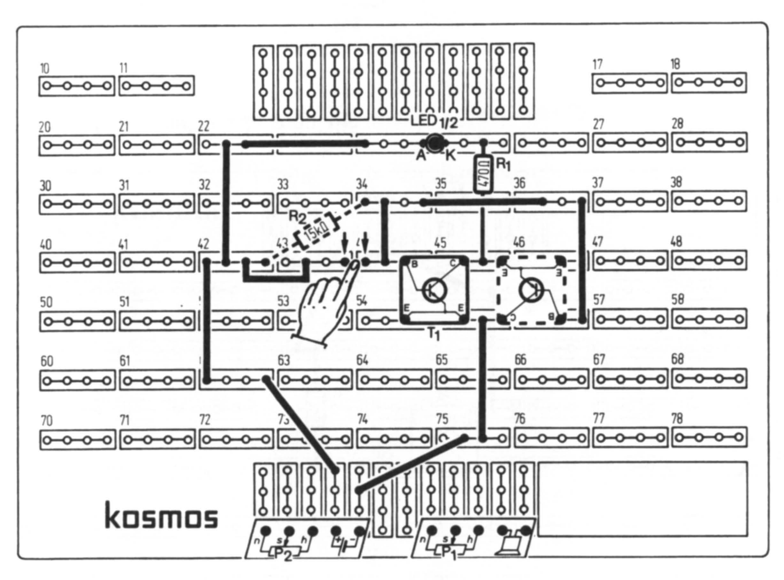


Bild 112. Aufbau zu Schaltung 111 und Schaltung 114.

4.2 Schwellenspannung: nur nicht stolpern!

Bis jetzt haben wir unsere Transistoren immer nur stromgesteuert. Das wird auch so bleiben. Aber welche Spannung ist notwendig, damit ein Steuerstrom über die Basis fließt?

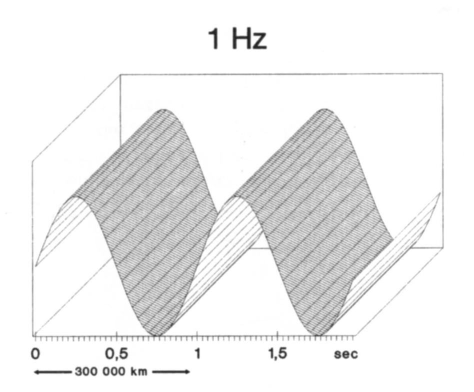


Bild 113. Eine elektromagnetische Welle legt in 1 Sekunde 300 000 km zurück. Die Wellenlänge entspricht dieser Strecke geteilt durch die Anzahl der Wellen, die sich pro Sekunde auf ihr befinden (Frequenz). Bei 1 Hz ergibt sich also eine Wellenlänge von 300 000 km.

Logischerweise ist dann die Länge einer Welle gleich der Ausbreitungsgeschwindigkeit geteilt durch die Frequenz.

$$\text{Wellenlänge} = \frac{300\,000\,000 \text{ m/s}}{f}$$

Für Kopfrechner: Wellenlänge in Metern = 300 geteilt durch Frequenz in MHz.

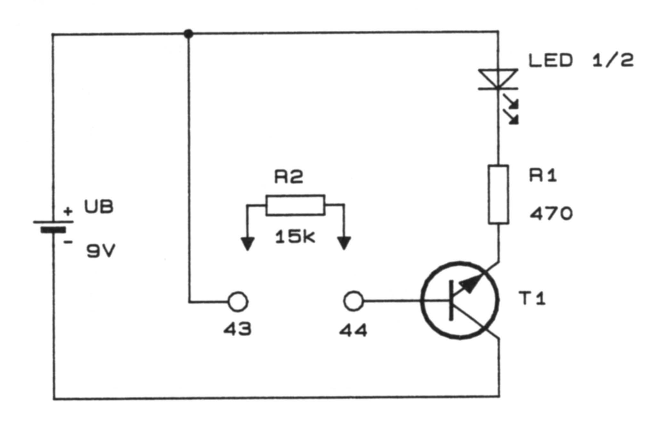


Bild 114. Wenn Emitter und Kollektor vertauscht sind, ist die Stromverstärkung wesentlich geringer. Unser Finger ist als Basis-Widerstand zu hochohmig.

Experimente

Wir messen die Schwellenspannung

Zum genauen Einstellen einer Steuerspannung benutzen wir in Bild 116 Poti P1 als einstellbaren Spannungsteiler. Wäre R1 nicht vorhanden, so könnten wir jede Spannung zwischen 0 und 9 V am Anschluß s des Potis einstellen. Da dies für den Versuch viel zu grob wäre, erweitern wir den Spannungsteiler durch den Widerstand R1. Dadurch verändert sich die Spannung an s beim Durchdrehen des Potis nur von 0 bis etwa 2 V. Zu Versuchsbeginn drehen wir den Drehknopf zunächst an den linken Anschlag, dann steigern wir die Basisspannung durch vorsichtiges Aufdrehen von P1. Zunächst passiert einmal gar nichts. Plötzlich beginnt LED2, schwach zu glimmen, um kurz darauf hell zu leuchten. Wir sind überrascht, denn von völliger Dunkelheit zu hellem Leuchten ging das Ganze sehr abrupt. Der Drehknopf müßte bei etwa 1,5 Skalenteilen (0,5 – 0,6 V) stehen, wenn die Diode aufleuchtet. Unterhalb dieser Schwelle tat sich überhaupt nichts. Daher der Name Hase! Diese Schwelle muß mindestens überwunden werden, wenn eine (Transistor-) Diode durchschalten soll. Die

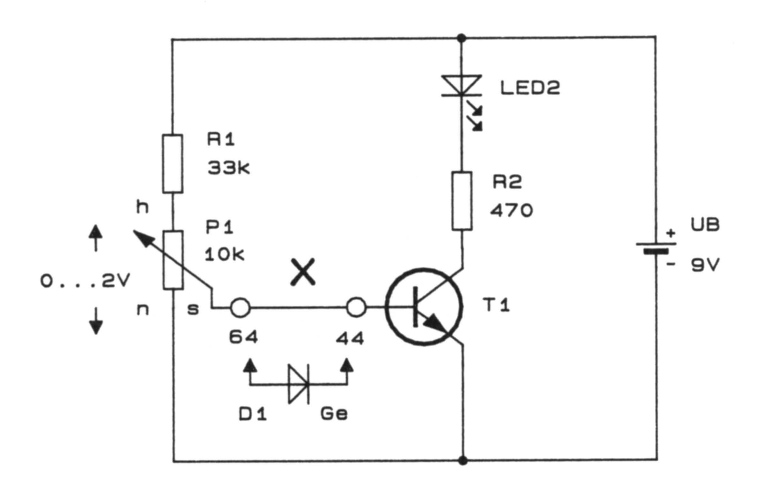


Bild 115. Prüfung der Schwellenspannung des Transistors.

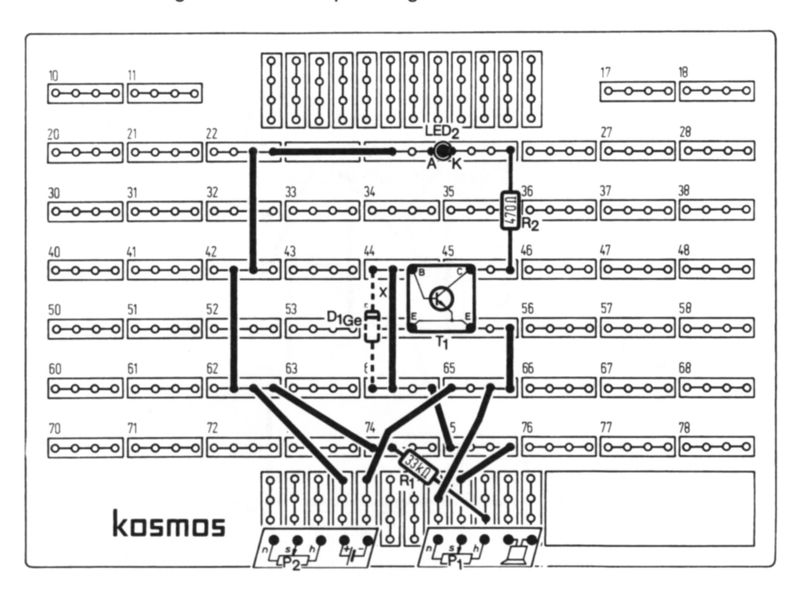


Bild 116. Aufbau zu Schaltung 115.

Schwellenspannung beträgt aber nur bei Silizium 0,6 V. Sie ist von Halbleitermaterial zu Halbleitermaterial unterschiedlich.



Know-how: Ionosphäre, der Spiegel über der Erde

Bereits im Jahre 1900 vermuteten die Amerikaner Kennelly und Heaviside die Existenz einer elektrisch leitenden Luftschicht in sehr großer Höhe. Das deutete darauf hin, daß ein großer Teil der vom Sender in den Raum hinausgehenden Strahlung in großer Höhe reflektiert und zur Erde wieder zurückgeworfen wurde (Bild 117).

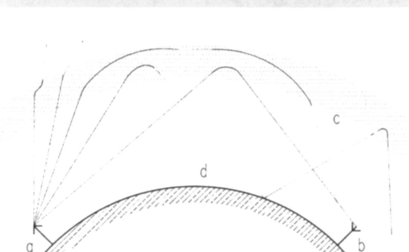


Bild 117. Kurzwellen (und bedingt auch Mittelwellen) werden durch die Ionosphäre in großer Höhe reflektiert und treffen dann erneut auf die Erdoberfläche. Kurzwellenverbindungen umspannen die ganze Erde. a: Sender, b: Empfänger, c: Ionosphäre, d: tote Zone.

Wir entfernen die Drahtbrücke X und setzen dafür die Germanium-Diode ein. Das Potentiometer P1 muß nun ein wenig weiter nach rechts gedreht werden, um die Schwellenspannung der Germanium-Diode (etwa 0,1 V ... 0,3 V) zu überwinden. Die Differenz ist klein, etwa 0,5 Skalenteile entsprechen der geringen Schwellenspannung der Germanium-Diode.

Anderes Material – andere Schwelle

Wir haben Transistor T 1 mit der Leuchtdiode samt Vorwiderstand als Anzeige verwendet. Wir müßten jetzt im Kopf aber immer von allen eingestellten Werten diese 0,6 V – die Schwellenspannung des Anzeigeinstrumentes – abziehen. Da Faulheit aber bekanntlich eine Göttergabe ist, sorgen wir einfach dafür, daß das Potentiometer nicht mehr bei 0 sondern erst bei 0,6 V beginnt. Dies könnten wir natürlich durch einen weiteren Widerstand am Anschluß n des Potis erreichen. Aber da sich die Schwellenspannung mit der Temperatur ändert, müßten wir im Winter einen anderen Widerstand verwenden als im Sommer. Wir benutzen einen viel genialeren Kniff: Wir bauen einfach ei-

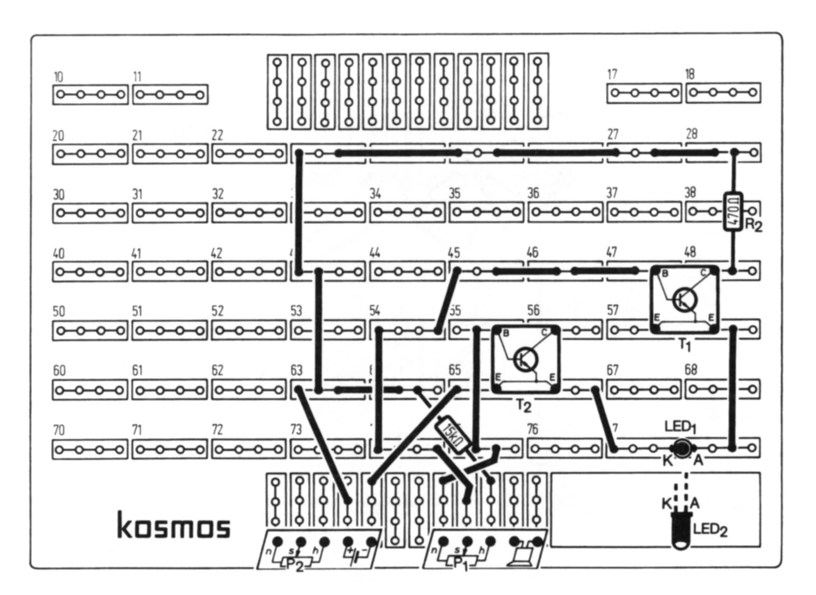


Bild 119. Aufbau zu Schaltung 118.

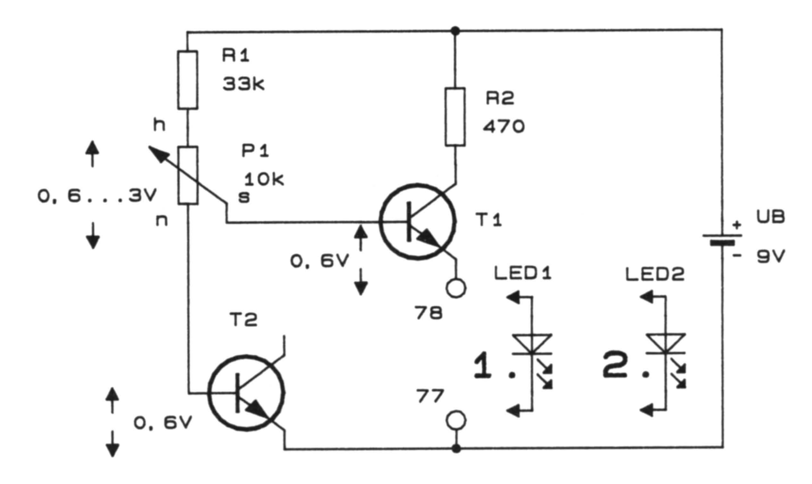


Bild 118. Messung der Schwellenspannung verschiedener Halbleitermaterialien.

ne weitere Basis-Emitter-Diode ein (Schaltbild 118, Aufbau 119). Da beide Transistoren T 1 und T2 die gleiche Temperatur haben, haben sie auch die gleiche Schwellenspannung, und das Prüfgerät funktioniert sowohl in der gut beheizten Stube wie auch draußen auf dem Balkon. Natürlich hat dieser Kniff auch einen richtig fachlichen Namen: Wir haben die Schwellenspannung und ihre Änderung mit der Temperatur **kompensiert.** Jetzt schalten wir nacheinander die rote und dann die grüne LED in den Prüfstromkreis (Steckfedern 77 und 78). Wir drehen das Potentiometer P1 bei „0" beginnend langsam nach rechts. Die rote LED beginnt bei etwa 3 Skalenteilen zu glimmen; das entspricht einer Schwellenspannung von etwa 1,6 V. Wenn das Poti nun vorsichtig weiter nach rechts verdreht wird, beginnt die grüne LED zu glimmen. Das wird bei etwa 3,5 Skalenteilen der Fall sein; das entspricht einer Schwellenspannung von 1,8 V.

Auch bei Langwellen ist diese Raumstrahlung vorhanden, aber hier ist die Bodenwelle wesentlich stärker. Die Schwunderscheinungen (das Fading) sind einfach darauf zurückzuführen, daß entweder Raum- und Bodenwelle oder zwei reflektierte Raumwellen, die unterschiedliche Wege zurückgelegt haben, am Empfangsort aufeinander treffen und sich gegenseitig stören. Später wurde festgestellt, daß die elektrisch leitende Schicht in Wirklichkeit aus einem ganzen System von Schichten mit verschiedenen Elektronenkonzentrationen in Höhen von 50 bis 400 km über der Erdoberfläche besteht. Verursacht werden diese Schichten sowohl durch die Teilchenstrahlung der Sonne (den solaren Wind) als auch auch durch die – Ironie des Schicksals – von der Sonne ausgehende elektromagnetische Strahlung. Die in diesen Höhen noch vorhandenen spärlichen Reste der Erdatmosphäre werden dabei ionisiert, d.h. den Luftatomen werden Elektronen aus ihrer äußersten Hülle herausgeschlagen. Daher der Name Ionosphäre.

Tabelle der Schwellenspannungen
(siehe auch Bild 120)

Germanium (Ge-Diode)	0,1 V ... 0,3 V
Silizium (Transistor)	0,6 V
Gallium-Arsenid-Phosphid (LED rot)	1,4...1,8 V
Gallium-Phosphid (LED grün)	1,8...2,0 V

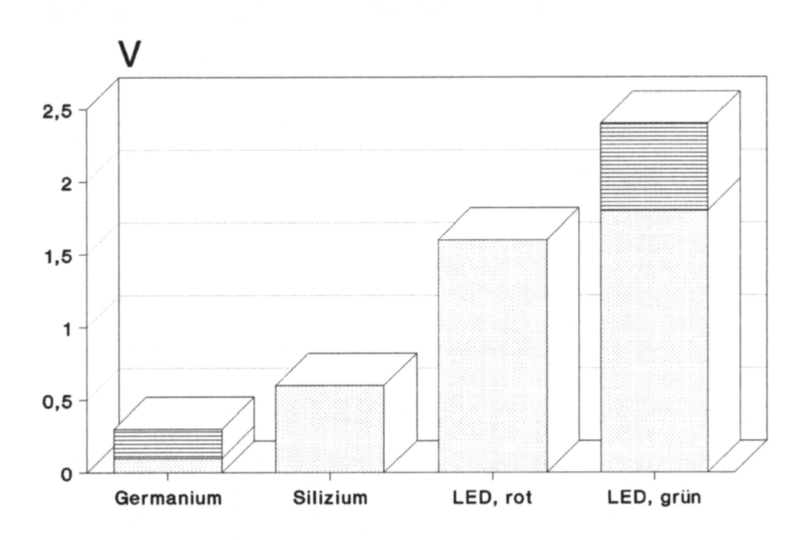


Bild 120. Die Schwellenspannungen verschiedener Halbleitermaterialien.

4.3 Feldeffekt-Transistoren: Steuerung ohne Leistung

Die „gute alte Elektronenröhre", wie sie mancher vielleicht noch aus Opas Dampfradio kennt, hatte gegenüber den Transistoren den großen Vorteil, daß sie keinen Steuerstrom benötigte. Aber auch dieses Problem ist gelöst. Bis zu Frequenzen von 30 GHz (Giga-Hertz) – das sind 30 Milliarden Schwingungen pro Sekunde – erledigen heute Feldeffekt-Transistoren das Geschäft. Selbstverständlich konnten auch wir nicht widerstehen und mußten unbedingt einen solchen Supertransistor in unseren Experimentierkasten aufnehmen.

Experimente

Ein MOSFET vom selbstleitenden Typ

Wir überzeugen uns von der Selbstleitfähigkeit eines MOSFET und lassen dabei zunächst außer acht, daß unser MOSFET, wie in Bild 121 zu sehen, zwei Gate-Anschlüsse hat; wozu zwei Gate-Anschlüsse bei einem FET nützlich sind, werden wir später sehen. Zu beachten ist, daß der Widerstand R1 in der Source-Leitung (Minus) angeordnet ist. Es kann sein, daß die LED sofort leuchtet, es muß aber nicht. Sie leuchtet aber garantiert, wenn wir unsere Hand den beiden Gate-Anschlüssen nähern, eventuell sogar kurz darauftippen. Mit etwas Übung können wir die LED ein- und ausschalten oder halbhell brennen oder flackern lassen, wenn wir mit unseren Fingern in der Nähe der Gate-Anschlüsse „herumfingern". Stimmt das mit der Selbstleitung vielleicht doch nicht so ganz? Garantiert, es stimmt! Die beiden Gate-Anschlüsse sind nur so gut vom Kanal (dem Substrat) isoliert, daß sie wie kleine Kondensatoren wirken. D.h. eine einmal aufgebrachte Ladung bleibt längere Zeit darauf bestehen und schnürt je nach Größe der Ladung den Kanal ab oder läßt ihn offen. Über das

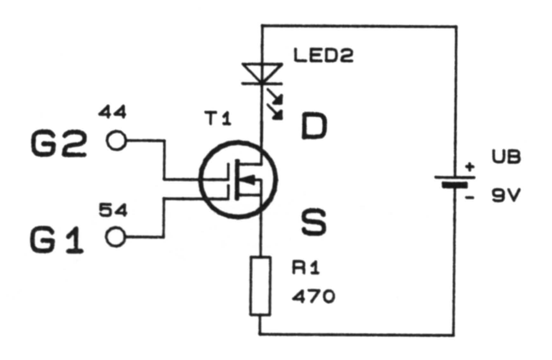


Bild 121. Wir überprüfen die Selbstleitfähigkeit, indem wir mit dem Finger an Gate 1 und Gate 2 tippen.



Know-how: Das Wetter stört den Fernsehempfang

Inversionswetterlagen (warme Luft liegt auf kalter), die uns den gefürchteten Smog bescheren, lösen bei UKW-Amateuren geradezu Begeisterung aus: An der Inversionsschicht werden die Signale reflektiert und treffen so in wesentlich größerer Entfernung wieder auf die Erde. Zwischen zwei solchen Schichten können die Wellen wie in einem Wellenleiter geführt werden und enorme Entfernungen überbrücken. Man spricht dann von einer Duct-(Schlauch-) Ausbreitung (Bild 122).

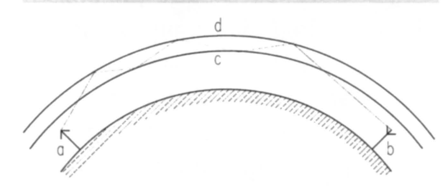


Bild 122. Bei bestimmten Wetterlagen bilden sich auch bei UKW-Rundfunk und Fernsehen sog. Überreichweiten aus. Zwischen zwei spiegelnden Luftschichten (c und d) werden die Funkstrahlen wie in einem Wellenleiter geführt und können so große Entfernungen über der Erdoberfläche zurücklegen (von a nach b). Dadurch kann es zu Fernsehstörungen kommen. Gleichzeitig französisches und spanisches Fernsehen in einem Bild ist jedoch nicht jedermanns Sache.

elektrische Feld zu unseren Fingern (wiederum ein Kondensator) und die entsprechenden Verschiebeströme kann dadurch berührungslos die Ladung auf den Gate-Kondensatörchen verändert werden. Dadurch verändert sich natürlich auch der Strom durch den Kanal.

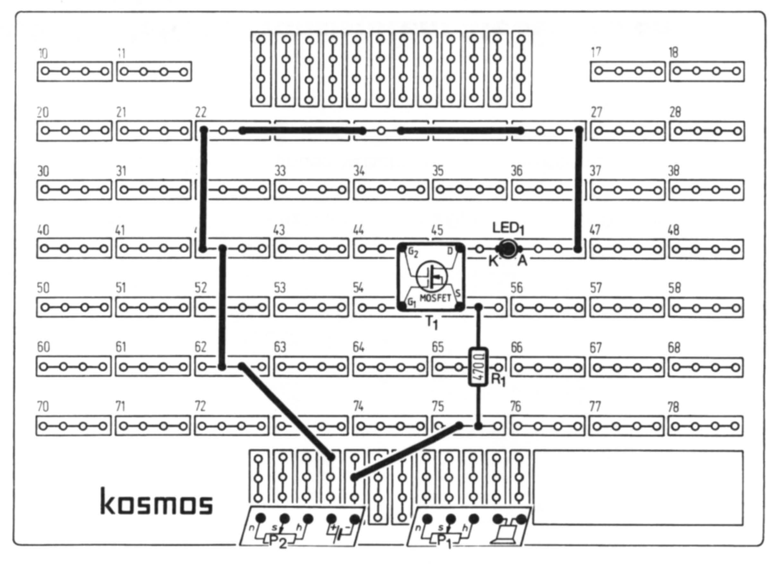


Bild 123. Aufbau zu Schaltung 121.

Dual-Gate-MOSFET: Doppelsteuerung

Der MOSFET hat sogar zwei Tore, wir sagten es schon. Es ist ein sogenannter Doppelgate-MOSFET oder mit der korrekten englischen Bezeichnung Dual-Gate-MOSFET. Jedes Gate kann für sich den Strom im Kanal steuern. Aber wenn ein Tor geschlossen ist, kann man das andere noch so weit aufreißen: es wird kein Strom fließen, logo (Bild 124). Im Versuch nach Bild 126 (Aufbau 127) steuern wir jedes Tor durch ein eigenes Poti. Um das Tor zu schließen, müssen die Gate-Spannungen negativ gegenüber Source sein (damit die Kanal-Elektronen den Bogen machen müssen). Natürlich könnten wir zwei Batterien verwenden, um

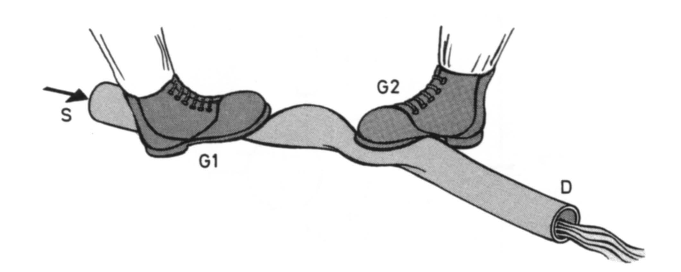


Bild 124. So kann man sich die Dual-Gate-Steuerung vorstellen.

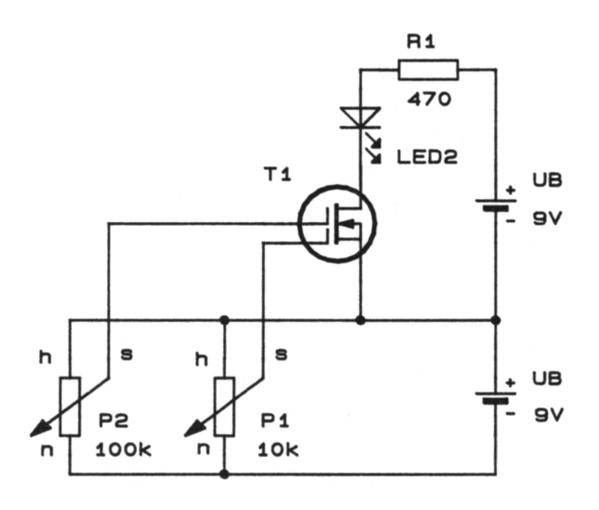


Bild 125. Unser MOSFET hat zwei Steuertore G1 und G2. Es ist ein Dual-Gate-MOSFET. Um ihn zu sperren, sind negative Gate-Spannungen erforderlich.

eine negative Gate-Spannung zu erzeugen. Durch einen Schaltungstrick kommen wir aber mit nur einer Batterie aus. Jetzt wird auch klar, warum wir R1 in die Source-Leitung gelegt haben. Der Spannungsteiler, gebildet durch die Widerstände R2 und R1, sorgt dafür, daß die Sourcespannung stets auf etwa 0,7 V liegt. Die Drain-Source-Spannung ist also rund 0,7 V niedriger als die volle Batteriespannung, die den beiden Potis voll zur Verfügung steht. Wenn die beiden Potis also auf Null gedreht sind, ist Sour-

Je kürzer die Wellenlänge wird, desto lichtähnlicher ist die Strahlung: Im UKW-Bereich behindert weder Nebel noch Regen den Empfang. Das ändert sich mitzunehmender Frequenz gewaltig. Wenn die Wellenlänge in die in die Größenordnung der Regentropfen kommt, werden die Wellen gedämpft und gestreut. Störungen drohen dem Satellitenfernsehen und dem Richtfunk also in erster Linie vom Wetter.

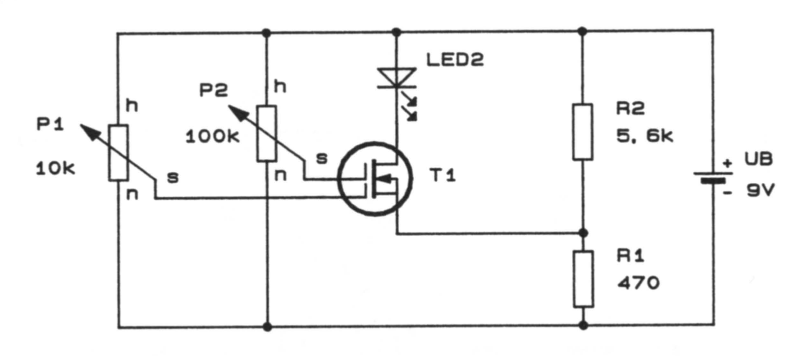


Bild 126. Ein Schaltungstrick macht Source positiver als die n-Anschlüsse der Potentiometer. Dadurch können die Gate-Spannungen negativer als der Kanal eingestellt werden.

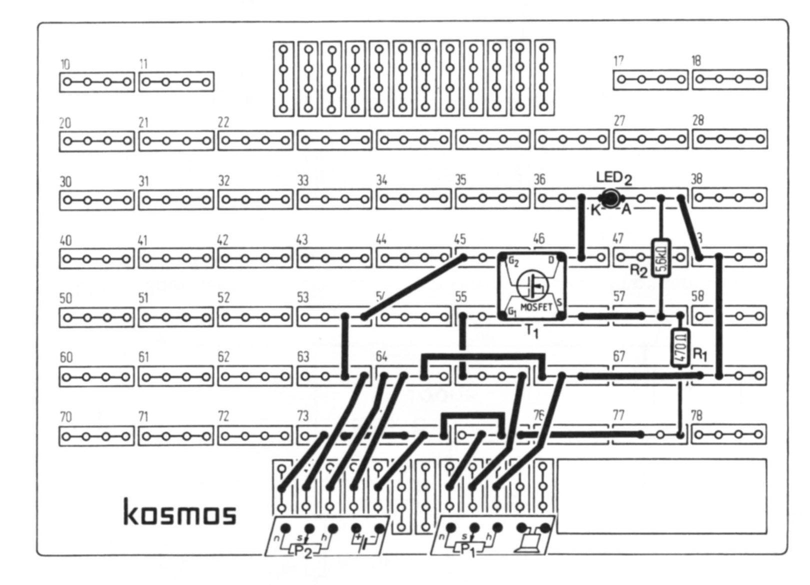


Bild 127. Aufbau zu Schaltung 126.

ce positiver als die beiden Gates. Das ist aber lediglich eine Standpunktfrage. Man kann auch sagen, daß die beiden Gates negativer als Source sind. Wir können jetzt jedes Poti zwischen 0 und 6 durchdrehen, ohne daß die Leuchtdiode sich auch nur im geringsten rührt. Jedenfalls solange das jeweils andere Poti auf Null steht. Es ist eben völlig egal, welches Tor den Kanal sperrt. Wenn dagegen ein Poti auf 6 gestellt wird – sprich ein Tor weit geöffnet wird -, dann kann an dem jeweils anderen die Helligkeit der LED stufenlos eingestellt werden.

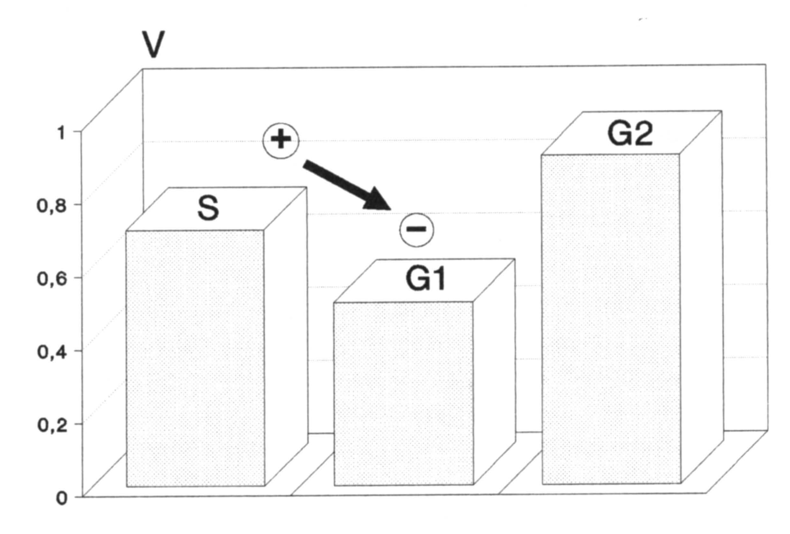


Bild 128. Standpunktfrage: Obwohl auch Gate 1 (gegenüber Masse) eine positive Spannung hat, sieht es doch von der höheren Source-Spannung aus betrachtet negativ aus.

Flip-Flop – mit nur einem Transistor

Man verwendet Flip-Flops als Speicherzellen in Computern. Sie bestehen gewöhnlich aus zwei Bipolar-Transistoren. Die großen Speicherchips moderner Computer funktionieren jedoch anders. Da über das Gate wirklich kein Strom fließt, genügt die Ladung eines Kondensators, um den jeweils eingestellten Zustand des Transistors beliebig lange zu halten. In Bild 131 haben wir an Gate 1 anstelle des Potis einen Kondensator und zwei Taster angeschlossen. Zur Grundeinstellung drücken wir zunächst auf den

Know-how: Bi- und Unipolar-Transistoren

Bei den „normalen" Transistoren müssen die Ladungsträger, negative Elektronen und positive Löcher, durch jeweils zwei Zonen mit unterschiedlicher Dotierung wandern, also durch n- und p-Schichten (Bild 129).

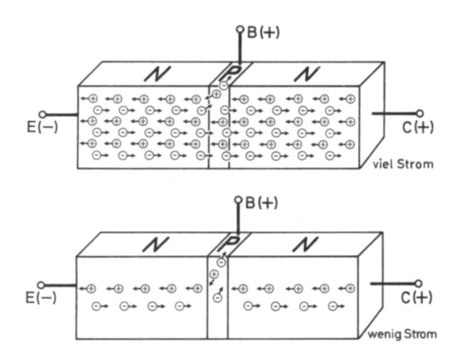


Bild 129. Ein „normaler" npn-Transistor. Am Ladungstransport sind sowohl Elektronen wie auch Löcher beteiligt. Deswegen heißt er Bipolar-Transistor.

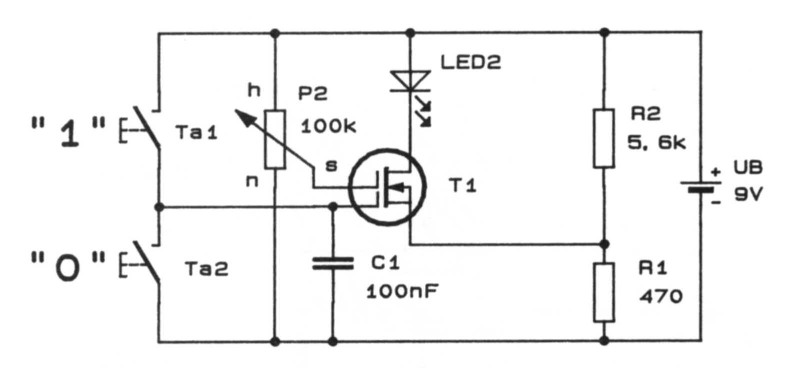


Bild 130. Speicher für ein Bit: Aus Feldeffekttransistoren und Kondensatoren baut man schnelle Speicherchips für Computer (DRAM).

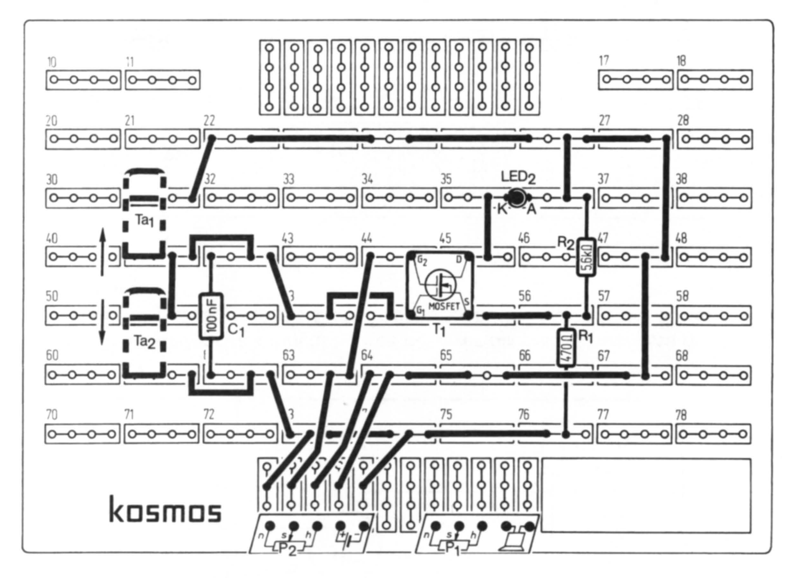


Bild 131. Aufbau zu Schaltung 130.

Taster Ta2 und stellen P2 so ein, daß LED1 gerade leicht glimmt. Richtwert: P2 auf ungefähr 3 einstellen. Mit Taster Ta1 kann die Leuchtdiode eingeschaltet werden. Ta1 lädt C1 auf. Und da weder über die offenen Taster noch über Gate 1 Strom abfließen kann, bleibt die Leuchtdiode eingeschaltet. Beim Druck auf Ta2 wird der Kondensator entladen. Gate 1 hat damit das Potential des Minuspols der Batterie, ist also negativ gegenüber Source, und damit verlischt die Leuchtdiode. Der jeweilige Tasterdruck bleibt also gespeichert und durch die Leuchtdiode angezeigt. Nach diesem Prinzip funktionieren heute die Arbeitsspeicher in den Personal-Computern (sogenannte dynamische RAM).

Sensordimmer

Wenn wir die (gestrichelt eingezeichneten) Taster entfernen und die Steckfedern nur durch unseren Finger überbrücken, können wir auch Zwischenwerte einstellen. Da unser Finger einen sehr großen Widerstand darstellt, wird der Kondensator nur sehr langsam aufge- bzw. entladen. Dabei werden alle Helligkeitsstufen der LED durchfahren. Wenn wir bei der gewünschten Helligkeit den Finger von den Sensortasten (von den Steckfedern) nehmen, bleibt die jeweilige Helligkeit gespeichert (Schaltbild 132).

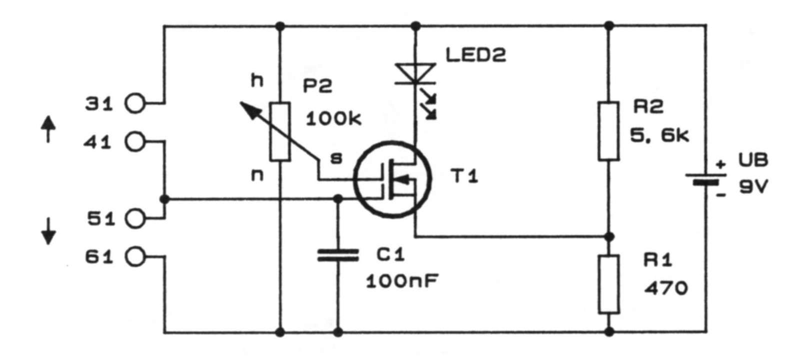


Bild 132: Ein Sensordimmer.

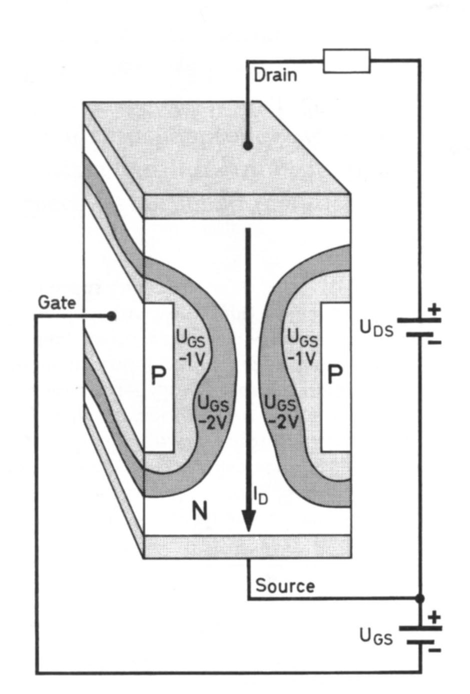


Bild 133. Aufbau und Anschluß eines Sperrschicht-FET.

Deshalb nennt man diese Transistoren auch Bipolar-Transistoren. Die Vorsilbe „Bi" deutet darauf hin, daß es sich um zwei verschiedene Ladungsträger handelt. Auch muß immer ein Steuerstrom fließen, damit ein Bipolar-Transistor auf seiner Arbeitsseite etwas tut. Um Leistung vom Bipolar-Transistor zu erhalten, muß man also erst einmal welche in ihn hineinstecken. Feldeffekt-Transistoren können dagegen völlig lei-

4.4 Integrierte Schaltungen: Alles in einem Gehäuse

Weder unsere heutigen Hochleistungscomputer noch superkleine Radios mit erstaunlicher Leistung wären realisierbar, wenn man sie noch aus Einzeltransistoren zusammenlöten würde. Der kleine schwarze Käfer auf dem Verstärkermodul beispielsweise enthält 17 Transistoren, die zu einer leistungsfähigen Schaltung zusammengefügt sind. Aber es ist nicht nur ein Zusammenfassen von mehreren Bauelementen in einem Gehäuse, es ist vielmehr die gemeinsame Entstehung auf einem einzigen Halbleiterplättchen – dem Chip –, was eine integrierte Schaltung ausmacht. Streng genommen ist unser npn-Transistor bereits eine integrierte Schaltung. Schließlich befinden sich zwei Dioden auf einem Chip. Heute ist man in der Lage, Tausende von Transistoren und Dioden auf einem einzigen Chip zu integrieren. Die eigentliche integrierte Schaltung ist dabei winzig klein. Um überhaupt noch in einer normalen Schaltung damit arbeiten zu können, muß man ein Riesengehäuse drumherum bauen mit im Verhältnis gigantischen Anschlußbeinen.

5. Verstärkertechnik

Zeit: 19:59 Uhr, Ort: NDR-Tagesschau-Studio in Hamburg, Tagesschausprecherin Dagmar Berghoff überprüft mit einem letzten kritischen Blick in den Kontrollmonitor den korrekten Sitz ihrer Frisur. Letzter Check der Instrumente, langsam zieht der Toningenieur den Regler auf. Die letzten Sekunden auf der computergesteuerten Uhr laufen. 20:00 Uhr – Gongschlag – das rote Licht mit der Aufschrift „Auf Sendung" leuchtet auf. „Guten Abend, meine Damen und Herren..."
Bevor die zarten Wechselspannungen des Mikrofons und bevor die schwachen Impulse des Bildwandlers der Kamera auf die Antenne des Senders gegeben werden können, müssen sie noch gewaltig verstärkt werden. Wir haben uns bisher schon der verschiedenartigsten Verstärkerschaltungen bedient. Nun wollen wir die Grundschaltungen der Verstärker unter die Lupe nehmen. Man unterscheidet die Verstärker nach dem gemeinsamen Anschluß für die Rückleitung der Stromkreise.

5.1 Emitterschaltung

Mit dem vollständigen Namen heißt diese Schaltung eigentlich Emitter-Basis-Schaltung. Diese korrekte Bezeichnung erzeugt leider mehr Mißverständnisse, als sie hilft. Basis heißt soviel wie Grundmauer oder Sockel. Gemeint ist bei dieser Bezeichnung, daß der Emitter an die gemeinsame Rückleitung, die Masse, angeschlossen ist (Bild 135).
Diese Bezeichnung – abgeleitet aus der Röhrentechnik – war so lange brauchbar, so lange es noch keinen Bauteilanschluß namens Basis gab. In der Transistortechnik führt diese Bezeichnungsart dann zu so kuriosen Namen wie Basis-Basis-Schaltung. Wir wollen die korrekten Namen meiden und uns an die Kurzformen halten. Sie sind letztendlich klarer. Bei der Emitterschaltung also – wir haben diese Schaltung bis jetzt ausschließlich verwendet – ist der gemeinsame Anschluß der Signalstromkreise der Emitter.

Experimente

Die Nein-Schaltung als Verstärker

Wiedersehen macht Freude! Unsere altbekannte Umkehrschaltung aus dem Multivibrator dient uns als Grundschaltung für Verstärker (Bild 137). Wir benutzen die Leuchtdioden zum Anzeigen der Spannungen am Transistor. Beim Einschalten brennt LED2 dauernd. Dies ist auch kein Wunder, denn der Transistor ist ja noch nicht angesteuert, d.h. er wirkt wie eine Unterbrechung im Stromkreis. LED2 bekommt ihren Strom über R3. Wenn der Taster Ta1 gedrückt wird, leuchtet LED1 auf. Der Transistor wird über den Basisvorwiderstand R2 angesteuert, und die Kollektor-

stungslos gesteuert werden. In ihnen müssen die Ladungsträger nur durch eine Zone mit gleicher Dotierung wandern, deswegen heißen sie Unipolar-Transistoren (Bild 134).

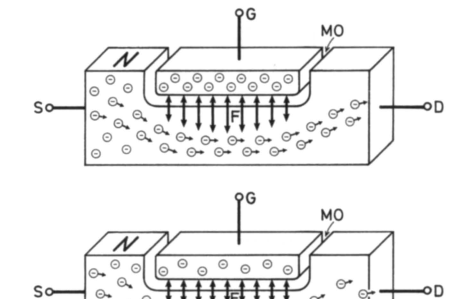


Bild 134. Ein MOSFET: S = Source (Quelle), G = Gate (Tor), D = Drain (Senke), MO = Metalloxid (SiO_2) zur Isolation, F = abstoßende Feldkräfte. Die am Stromfluß beteiligten Ladungsträger werden von ihren Kameraden auf der Gate-Elektrode abgedrängt. Je mehr Ladungsträger das Gate besetzt halten, desto schmaler wird der für den Stromfluß zur Verfügung stehende Kanal durch das Substrat.

Diese Bezeichnung dient jedoch nur zur Klassifizierung. Im üblichen Sprachgebrauch werden sie ausschließlich nach ihrer Funktionsweise benannt: Feldeffekt-Transistoren oder kurz FET!

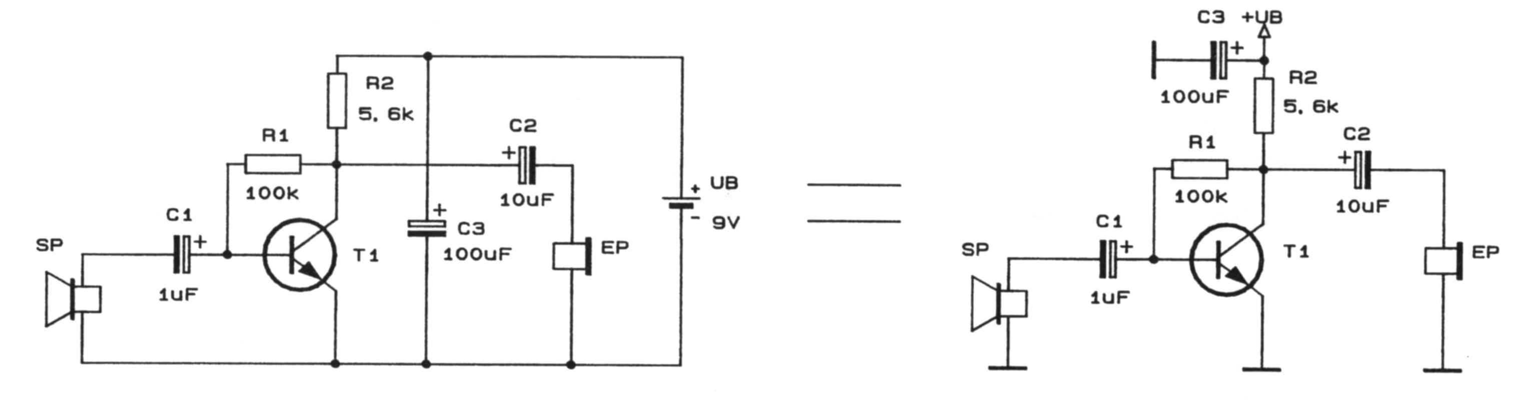


Bild 135. Diese beiden Bilder stellen ein und dieselbe Schaltung dar. Das gemeinsame Potential ist die Masse (die Minusleitung). Sie wird durch einen kleinen Strich dargestellt. Alle Anschlüsse, die zu diesem Strich führen, sind miteinander verbunden.

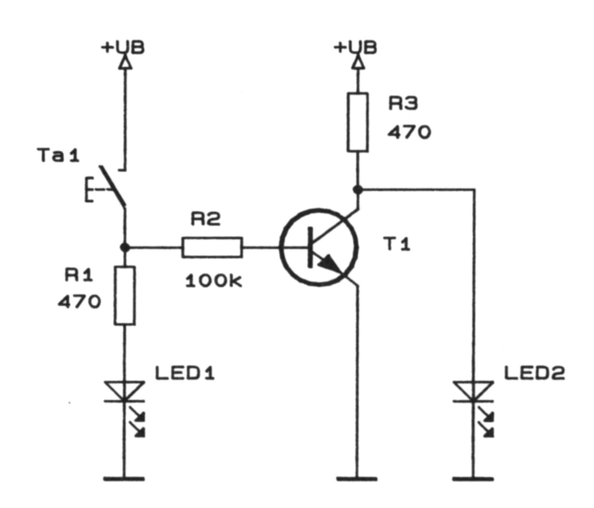


Bild 136. Prüfung der Phasenlage: Die LED zeigen die Spannung am Ein- und Ausgang der Emitterschaltung an.

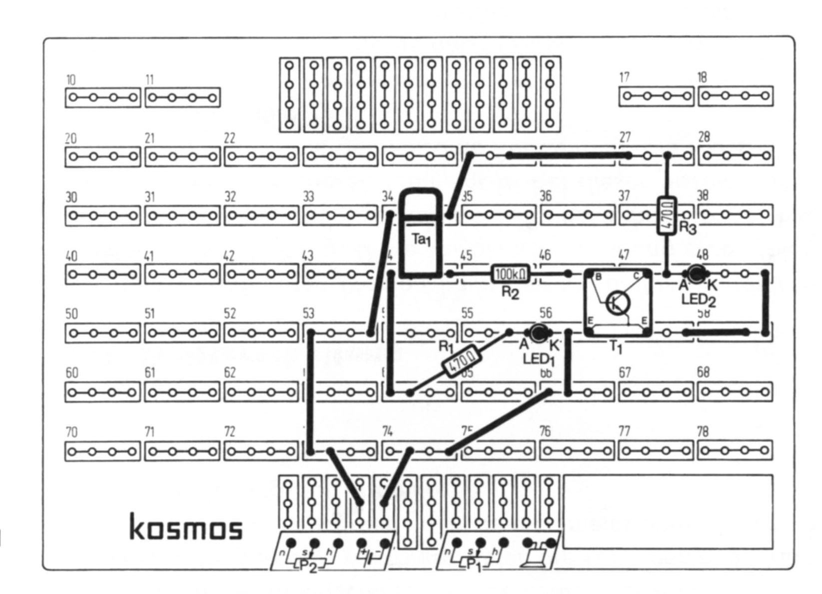


Bild 137. Aufbau zu Schaltung 136.





Bitte freimachen

An den
Kosmos-Verlag
Abt. Ersatzteile / SHT
Postfach 10 60 11

D-7000 Stuttgart 10

Ich bitte um Zusendung eines KOSMOS-Ersatzteilbestellscheines für den KOSMOS-Experimentierkasten:

. . . .

____

____

Vorname, Zuname

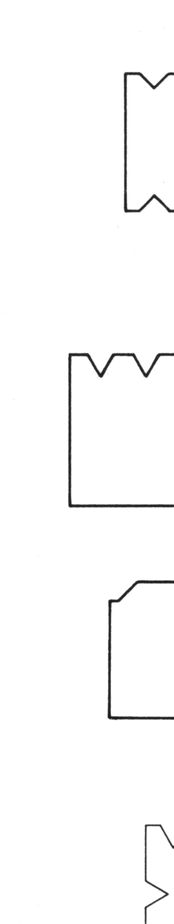
____

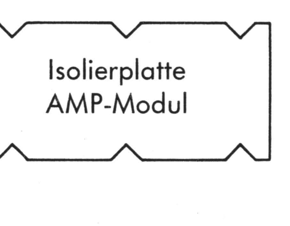
Straße, Hausnummer

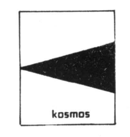
____

PLZ, Ort

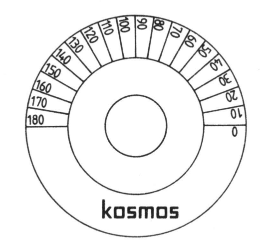
Absender: (Bitte in Druckschrift)





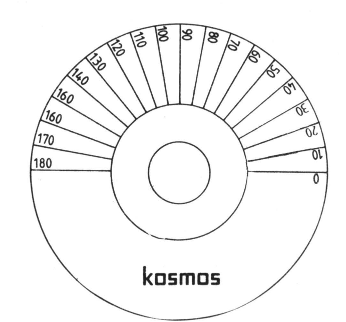


Isolierplatte
VHF-Modul



Isolierplatte
MF-Modul





Ausschneidetafel



Know-how FET:
Kanäle werden zugeschnürt!

Die Elektronen müssen sich durch einen schmalen Kanal von der Quelle bis zur Senke quälen. Auf „neudeutsch“ (englisch) heißt Quelle Source und Senke Drain. Auf ihrem Weg durch den schmalen Kanal müssen die Elektronen an einem Tor vorbei (englisch Gate). Bei diesem FET handelt es sich um einen sogenannten MOSFET, einen **M**etall**o**xid-**S**ilizium-**F**eld**e**ffekt-**T**ransistor. Das Metalloxid hat lediglich die Aufgabe der Isolation. Rost z.B. ist Eisenoxid, und verrostete Batteriekontakte haben schon so manchen Walkman zum Schweigen gebracht. Das Gate wird vollständig durch das Metalloxid vom Kanal isoliert. Es hat also keine leitende Verbindung zu den Kanalelektroden. Gate und Kanal bilden somit ein kleines Kondensatörchen. Wenn Elektronen auf das Gate aufgebracht werden, wirkt ihr Feld weit in die Kanalzone hinein. Die im Kanal wandernden

Emitter-Strecke verhält sich wie ein Kurzschluß. Dadurch verlöscht natürlich LED2. Also immer dann, wenn die Basisspannung hoch ist, geht die Kollektorspannung nach unten und umgekehrt, alles wie gehabt!

Analog: Mehr als nur zwei Zustände

Wir ersetzen den Taster durch das Poti P1 (Schaltung 144). Dadurch sind wir in der Lage, die Steuerspannung nicht nur einzuschalten, sondern stufenlos einzustellen. Wir verfolgen die Reise der Eingangsspannung unseres Verstärkers und die Auswirkung auf die Ausgangsspannung am Kollektor. Bei Potistellung 0 brennt LED2, alles wie gehabt; wir drehen langsam weiter auf. Beim Erreichen der Transistor-Schwellenspannung beginnt sie zunächst, ganz leicht dunkler zu werden. Mit zunehmendem Hellerwerden von LED1 wird LED2 gleichmäßig dunkler und umgekehrt, wenn wir Poti P1 wieder zurückdrehen. (Know-how S. 69)

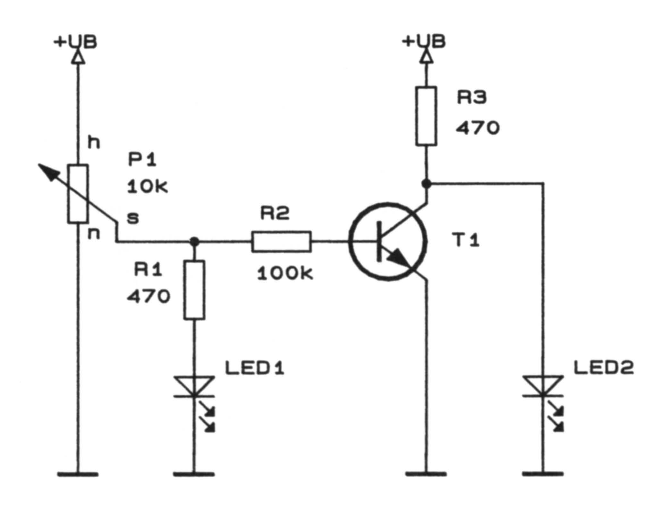


Bild 138. Die Helligkeit ist stufenlos einstellbar.

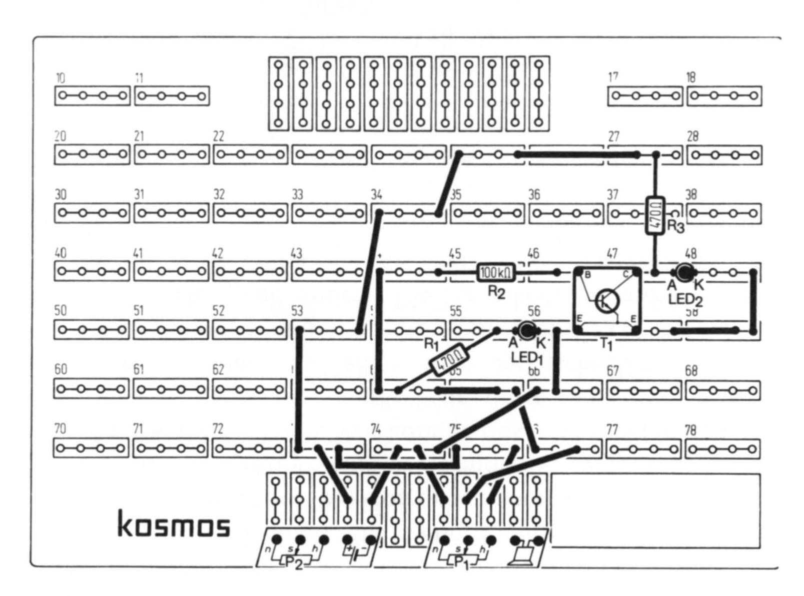


Bild 139. Aufbau zu Schaltung 138.

Kennlinien sind natürlich kein Selbstzweck! Sie sind nur Hilfsmittel für die richtige Dimensionierung von Verstärkern. Wir wollen Sprache und Musik verstärken, tonfrequente Wechselspannungen also. Im Prinzip funktionieren Hochfrequenzverstärker genauso. Niederfrequenz wird mit den Buchstaben NF abgekürzt. International ist aber die Abkürzung AF für „Audio Frequency“ eingeführt. Wir werden deshalb die Abkürzung AF(NF) verwenden. Doppelt hält besser!

Wechselspannung sitzt Huckepack auf der Gleichspannung

Beim schnellen Hin- und Herdrehen von P1 erzeugen wir eine schwankende Gleichspannung. Wir erkennen dies am Flackern der Leuchtdioden. Eine schwankende Gleichspannung kann man sich auch aus einer Gleichspannung mit einer überlagerten

Elektronen machen einen großen Bogen um ihre auf dem Gate ruhenden Kollegen und haben dadurch immer weniger Platz für ihren Stromfluß. Der wirksame Querschnitt des Kanals wird also verringert, und das ist bekanntlich gleichbedeutend mit erhöhtem Widerstand. Es können damit weniger Elektronen von Source nach Drain fließen. Wenn die Elektronen vom Gate abgezogen werden, steht dagegen die volle Kanalbreite zur Verfügung, und die Elektronen können sich wie Autos frei auf der Autobahn bewegen. In diesem Fall hat der Kanal seinen geringsten Widerstand. Im Gegensatz zu einem Bipolar-Transistor ist also der MOSFET ohne Steuerspannung am Gate bereits leitfähig und wird durch negative Gate-Spannung gesperrt. Wenn sich nämlich sehr viele Elektronen auf dem Gate befinden, also wenn die Gate-Spannung gegenüber dem Kanal stark negativ ist, ist der Kanal wie abgeschnürt. Man spricht dann von der sogenannten Abschnürspannung oder auf englisch pinchoff-voltage.

Wechselspannung zusammengesetzt denken. Da eine Wechselspannung ständig ihre Richtung (ihre Polarität) ändert, wird sie sich einmal zu der Gleichspannung addieren und sich bei der anderen Polarität von ihr abziehen. Die Folge ist ein ständiges Auf und Ab auf der Kennlinie. Der schwankende Kollektorstrom erzeugt am Kollektorwiderstand wiederum eine schwankende Gleichspannung. Hinter dem Koppelkondensator bleibt nur noch astreine Wechselspannung übrig. Da bei passender Bemessung des Widerstandes die Ausgangsspannung größer als die Eingangsspannung ist, können wir mit Fug und Recht von einem Wechselspannungsverstärker sprechen. Und da wir wissen, daß das elektrische Abbild von Tönen immer Wechselspannung ist – denken wir nur an die Ausgangsspannung eines Mikrofons –, läßt sich Sprache und Musik einfach dadurch verstärken, daß sie, überlagert mit der Gleichspannungs-Grundeinstellung, dem Transistor zugeführt wird.

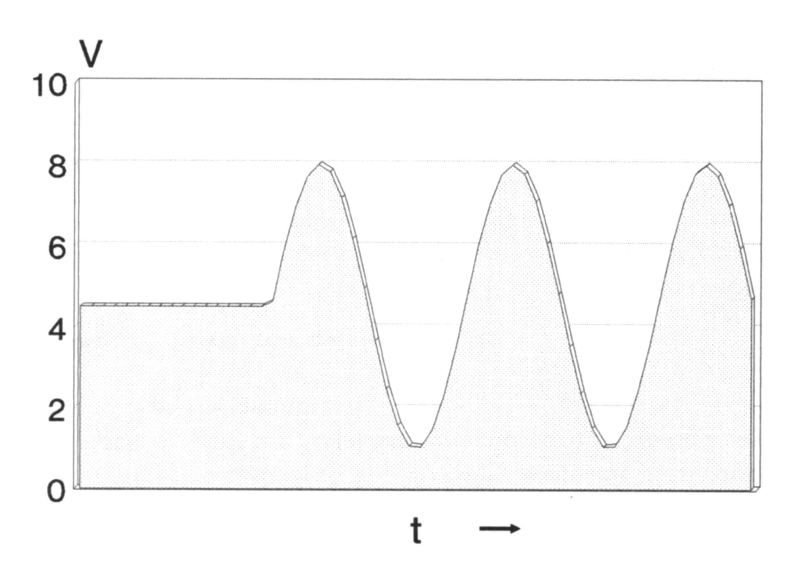


Bild 140. Eine Wechselspannung wird einer Gleichspannungs-Grundeinstellung (dem Arbeitspunkt) überlagert.

Aussteuerungsanzeige mit LED

Als Quelle für tonfrequente Spannungen können wir sehr gut den Kopfhörer- oder Lautsprecheranschluß eines Walkmans oder eines kleinen Taschenradios benutzen. Tips zum Anschließen gibt Bild 91. Bei besonderer Vorsicht kann Papas Stereoanlage herhalten. Zur Not können wir auch einen alten Bekannten von uns, den Mikrofonverstärker, benutzen. Eindrucksvoller freilich gelingen die Versuche mit Musik. Die Kondensatoren C1 und C2 in Schaltung 144 (Aufbau 143) sind Gleichspannungssperren und lassen nur die Wechselspannung passieren. Auf der Arbeitsseite des Transistors müssen wir noch eine besondere Maßnahme ergreifen, die für Wechselspannungsverstärker typisch ist: Weil dem Wechselstrom, der es ja wesentlich eiliger als der Gleichstrom hat, der Weg über die langen Anschlußdrähte und über die Batterie zu weit werden könnte, bekommt er eine bequeme Abkürzung über C3. Der Wechselstromkreis wird also direkt (über C3) gegen Masse geschlossen. Die Techniker sagen dazu: „Der Transistor wird abgeklatscht". Mit dem Poti P1 wird der Arbeitspunkt von T 1 eingestellt. Denn damit der Transistor seinen Widerstand zwischen Kollektor und Emitter in möglichst weiten Bereichen ändern kann, muß er normalerweise auf einen mittleren Wert eingestellt sein. Wir können das am Leuchten von LED1 beobachten. LED1 zeigt den Kollektorstrom von T 1 an. Wir stellen sie auf eine mittlere Helligkeit ein. Jetzt schließen wir unsere Tonfrequenzquelle an und beobachten, daß die LED im Takt der Musik ihre Helligkeit ändert. Die Helligkeitsschwankungen sind umso größer, je lauter wir das Radio oder den Walkman aufdrehen.

Arbeitspunkt: Klirren und Verzerren

Während wir im Hörer die Musik hören, verändern wir die Einstellung von P1. Sowohl bei niedrigen Basisvorspannungen (kleiner Kollektorstrom, LED1 ist dunkel) als auch bei hohen Basisvorspannungen (großer Kollektorstrom, LED1 ist hell) bemerken wir deutliche Verzerrungen. Am klarsten klingt es bei einer mittleren Einstellung des Potis. Nämlich dann, wenn der Arbeitspunkt sich

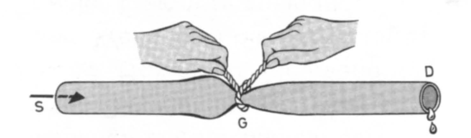


Bild 141. Die Spannung, die am Gate notwendig ist, um den Stromfluß ganz zu unterbinden, heißt Abschnürspannung oder Pinch-off-Voltage.



Know-how: Phasenlage

Betrachten wir dazu die beiden Schwimmer in der Brandung (Bild 142).

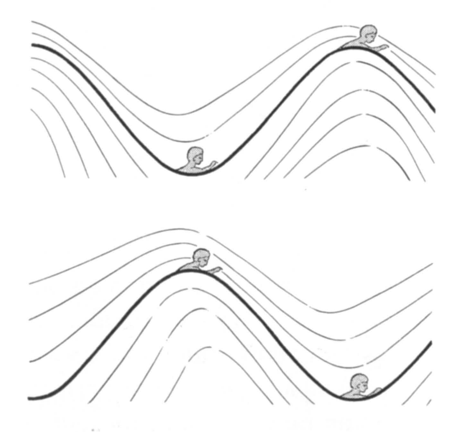


Bild 142. Die beiden Schwimmer schwingen in Gegenphase: Wenn einer oben ist, ist der andere unten.

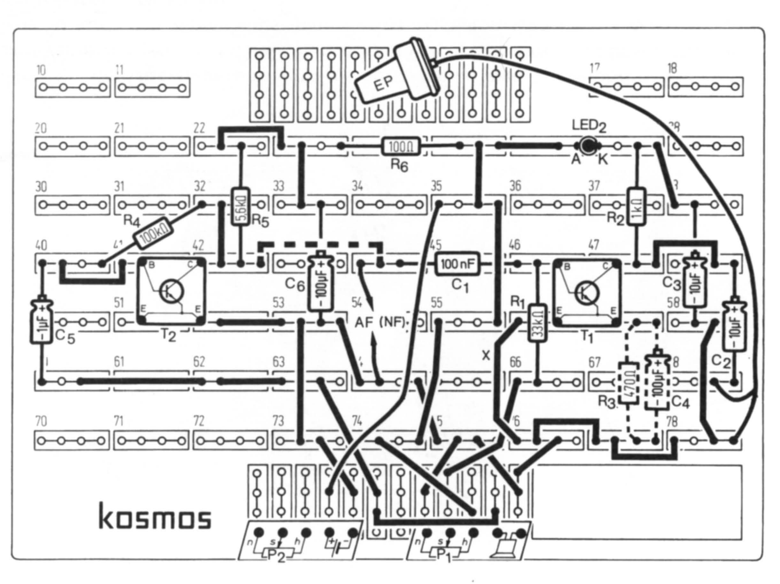


Bild 143. Aufbau zu Schaltung 144.

etwa in der Mitte des geraden Teils der Kennlinie befindet. Aber selbst bei dieser Einstellung kommt es zu Verzerrungen, wenn wir unseren Verstärker übersteuern. D.h., wenn die steuernde NF-Spannung so groß ist, daß die Enden der Kennlinie oben und unten erreicht werden. In Bild 146 haben wir die Enden der Kennlinie durch zwei große Glaswände dargestellt. Die NF-Wechselspannung entspricht der Schwingung des Pendels (Bild 147). Wenn das Pendel zu weit ausschlägt, trifft es auf jeder Seite die Glasplatte. Die Aufhängung des Pendels sollte sich möglichst genau in der Mitte zwischen den Glaswänden befinden, damit das

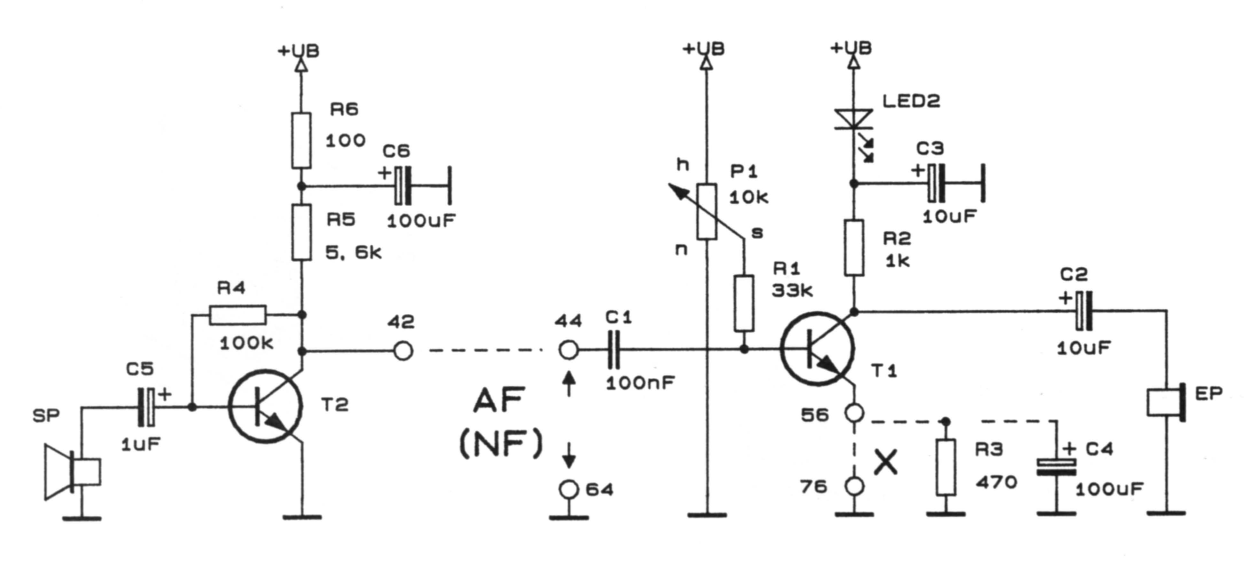
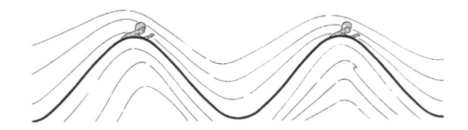


Bild 144. Ein Niederfrequenzverstärker in Emitterschaltung: Der linke Schaltungsteil, der Mikrofonverstärker, kommt nur dann zum Einsatz, wenn es Schwierigkeiten macht, die Steckfedern 44 und 64 direkt an den Ausgang einer Tonfrequenzquelle (Radio oder Cassettenrekorder) anzuschließen (X: siehe Text S. 69).

Wenn einer auf dem Wellenberg schwimmt, ist der andere immer im Wellental und umgekehrt. Die beiden Schwimmer schwingen immer gegenphasig zueinander auf und ab. Anders die beiden Schwimmer in Bild 145.



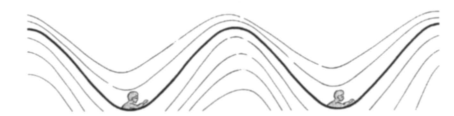


Bild 145. Die beiden Schwimmer schwingen hier in Phase. Dazu müssen sie sich jeweils auf dem gleichen Niveau der Welle befinden.

Sie schwingen in Phase zueinander: Sie sind entweder beide oben oder beide unten. Phase ist so etwas wie ein Schnappschuß, das Einfrieren eines bestimmten Zeitabschnittes. Beispiel: Die Mondphasen Vollmond, Halbmond, Neumond usw. Wenn man die Phasenlage zweier Ereignisse zueinander vergleicht, wird meistens als Maß ein Winkel angegeben.

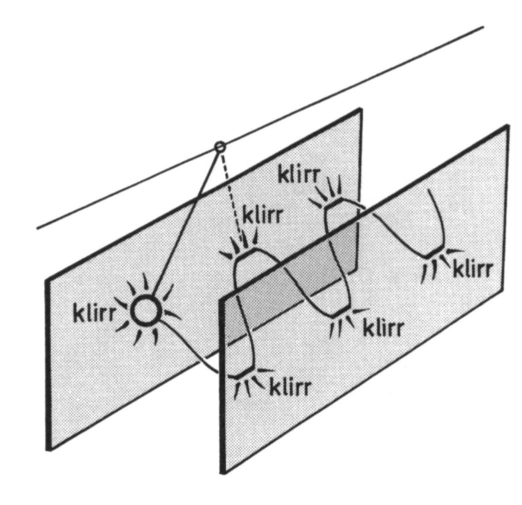


Bild 146. Ein zwischen zwei Glasplatten angeordnetes Pendel schwingt zu heftig und schlägt klirrend gegen das Glas.

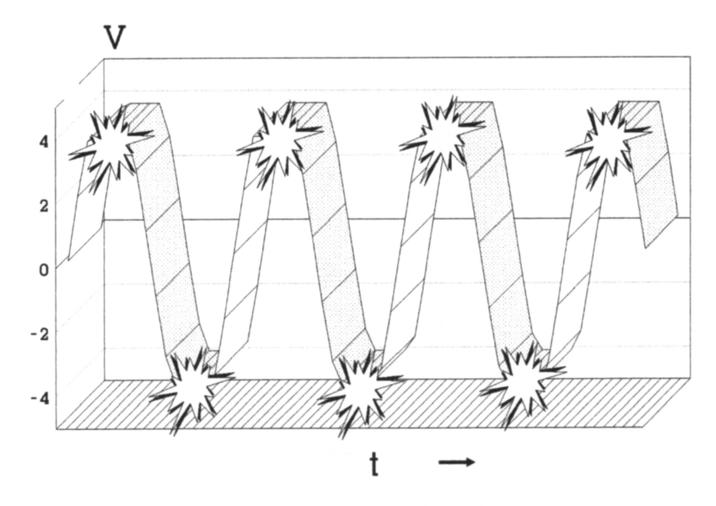


Bild 147. Bei Übersteuerung wird die Kennlinie zu weit ausgefahren. Die Folge sind Verzerrungen sowohl bei den positiven wie auch bei den negativen Halbwellen. So kann aus einer Sinus- eine Rechteckfunktion werden. Gitarren klingen dann besonders ‚rockig'.

Pendel nach beiden Seiten gleichweit ausschlagen kann. Die Aufhängung des Pendels entspricht unserer Arbeitspunkteinstellung. Selbst bei recht kleinen Amplituden kommt es zum Klirren, wenn die Aufhängung extrem zu einer Seite hin verschoben ist (Bilder 148 und 149), wenn also der Arbeitspunkt des Verstärkers zu weit oben oder unten auf der Kennlinie liegt.

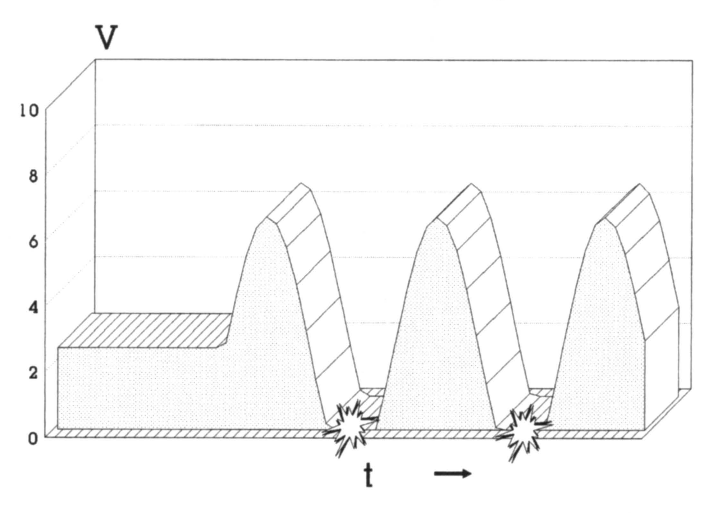


Bild 148. Bei zu niedriger Arbeitspunkteinstellung werden dagegen die negativen Halbwellen gestaucht, da sich ihnen das Massepotential in den Weg stellt.

Temperatur läßt den Arbeitspunkt wandern

Unser Verstärker hat noch einen Schönheitsfehler, den wir jetzt kennenlernen werden. Wir steuern die Emitterschaltung voll aus, gerade soweit, daß es noch nicht klirrt. Nun blasen wir den Transistor vorsichtig mit einem Haartrockner an. Nach einer Weile klingt der Ton verzerrt. Wir können mit P1 den Arbeitspunkt korrigieren, bis er wieder klar wird. Als nächstes legen wir dem Transistor ein kleines Stückchen Eis aufs Gehäuse. Erneut beginnt der Arbeitspunkt zu wandern, bis es wieder klirrt. Der Grund dafür ist, daß die Schwellenspannung des Transistors stark tempera-

Eine Drehung in die entgegengesetzte Richtung, wie bei der Emitterschaltung oder unseren Schwimmern, entspricht einem Phasenwinkel von 180°. Gleichphasigkeit ist bei einem Winkel von 0° bzw. 360° (volle Drehung) gegeben.



Know-how: Kennlinie: Analog oder digital? (zu S. 65)

In Bild 150 haben wir den Zusammenhang grafisch dargestellt. Man nennt eine solche Kurve Übertragungskennlinie. Sie zeigt, daß es zuerst ein Anlaufgebiet gibt (beginnend bei Null), in dem nichts oder nur sehr wenig geschieht. Im mittleren Bereich folgt die Ausgangsgröße (die Helligkeit von LED2) weitgehend linear der Eingangsgröße (dem Drehwinkel des Potis). Hier befindet sich der eigentliche Arbeitsbereich einer Analog-Schaltung.
Nach erreichter Maximalhellig-

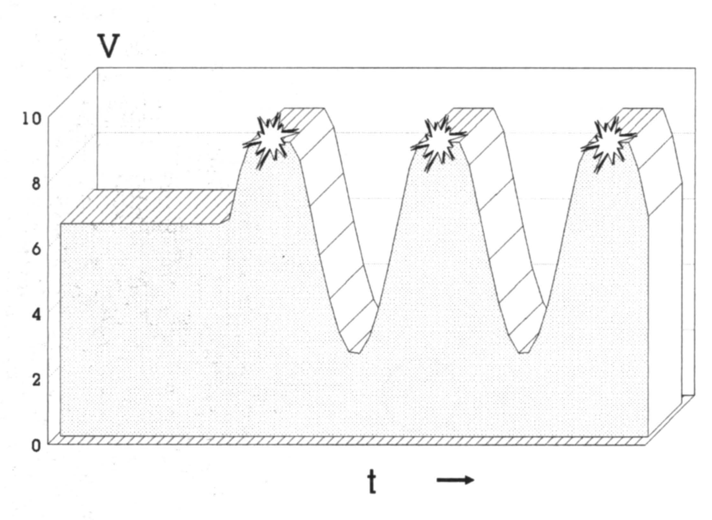


Bild 149. Wenn der Arbeitspunkt zu hoch eingestellt ist, werden die positiven Halbwellen verzerrt, weil sie an die Betriebsspannung (9 V) anstoßen.

turabhängig ist. Dies stört natürlich gewaltig, wenn wir mühsam den richtigen Arbeitspunkt ermittelt haben und den Verstärker voll aussteuern. In einem anderen Raum, bei einer anderen Temperatur würde er erneut zu klirren beginnen. Es gibt aber raffinierte Tricks, ihm das abzugewöhnen.

Stabilisierung: Der Arbeitspunkt wird festgehalten

Der erste Trick für Aufbau 143 ist die sogenannte Stromgegenkopplung. Dazu ziehen wir die Drahtbrücke X heraus und fügen den im Aufbau gestrichelt eingezeichneten Widerstand R3 in die Emitterleitung ein. Leider sinkt dadurch die Verstärkung des Transistors stark ab. Trotz Nachkorrigierens des Arbeitspunktes müssen wir das steuernde Radio oder den Walkman wesentlich stärker aufdrehen. Ein bißchen Verstärkung können wir dadurch gewinnen, daß wir zum Emitterwiderstand R3 den Kondensator C4 parallel schalten. Zumindest der Wechselstrom kann dann ohne Hindernisse vom Emitter durch C4 zur Masse fließen. Der Name Emitterschaltung ist – obwohl der Emitter jetzt nicht mehr direkt an die Masse angeschlossen ist – noch immer richtig, da es auf die Signalstromkreise ankommt.

Spannungsgegenkopplung: Einfach, aber wirksam

Von dem zweiten Trick zur Stabilisierung, der Spannungsgegenkopplung, haben wir schon öfter Gebrauch gemacht. Da die Ausgangsspannung immer andersherum will als die Eingangsspannung, kann man einen Teil davon dem Kollektor abzapfen und wiederum der Basis zuführen (beachte Gegenkopplung im linken Teil von Schaltung 144); sie bewirkt dann immer gerade das Gegenteil. Gleichzeitig wird über denselben Widerstand die Basis mit dem notwendigen Steuergleichstrom versorgt. Dieser Gegenkopplungswiderstand erledigt zwei Fliegen mit einer Klappe. Wann immer man eine einfache NF-Verstärker-Schaltung braucht: die Spannungsgegenkopplung funktioniert sicher!
Die Emitterschaltung ist die am meisten verwendete Verstärkerschaltung. Sie hat eine erfreulich hohe Spannungsverstärkung, aber sie ist für saftige, stromfressende Verbraucher an ihrem Ausgang nicht geeignet. Den Lautsprecher beispielsweise könnten wir nicht direkt damit betreiben.

5.2 Kollektorschaltung

Es gibt doch die widersinnigsten Dinge! Jetzt lernen wir eine Verstärker-Schaltung kennen, die keine Verstärkung hat. Wozu, um Himmels Willen, braucht man denn einen Verstärker ohne Verstärkung? Zunächst müssen wir uns darüber klar werden, was wir verstärken wollen. Zweifellos brauchen wir meistens eine Spannungsverstärkung. Oft aber kommt es auch vor, daß die Ausgangsspannung zwar hoch genug ist, die Verstärkerschaltung jedoch nicht genügend Strom liefern kann. Hier kommt es also

keit können wir das Poti so weit aufdrehen, wie wir wollen: die Kennlinie geht in die Sättigung, d.h. sie steigt nicht weiter an.

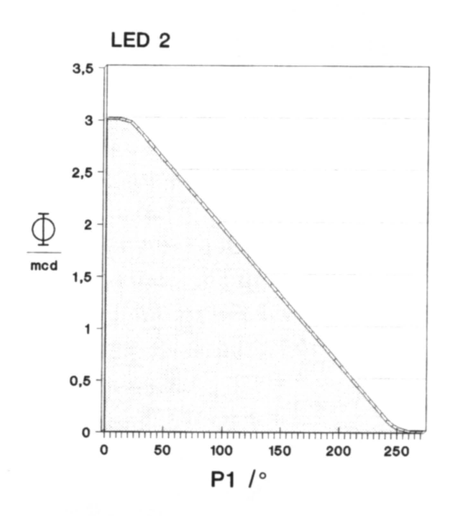


Bild 150. Kennlinie: Anstatt nur ein- und auszuschalten, kann der Transistor auch alle Zwischenwerte einstellen. Die Grafik zeigt den Zusammenhang zwischen dem Drehwinkel des Potis P1 und der Helligkeit der Leuchtdiode.

Im Gegensatz dazu gibt es bei einer Digitalschaltung nur zwei Zustände: Ein und Aus, nur ein Entweder-Oder! Dazwischen ist Niemandsland. Infolgedessen ist die Kennlinie extrem steil. Sie entspricht dem Verhalten eines Schalters. Eine Digitalschaltung ist also eigentlich eine Analogschaltung, deren Verstärkung

mehr darauf an, den verfügbaren Strom zu verstärken. Da wir uns hier in ein „saftiges" Gebiet begeben, sprechen wir also besser von Leistungsverstärkung.

Experimente

Phasenlage: Ohne umzudrehen

Bei der Kollektorschaltung muß definitionsgemäß natürlich der Kollektor der gemeinsame Anschluß für die Signalstromkreise sein (Schaltung 151, Aufbau 152). Wir wollen uns zuerst über die Phasenlage Klarheit verschaffen. Dazu benutzen wir wieder die Leuchtdioden zur Anzeige. Wenn wir den Taster drücken, leuchten beide LED gleichzeitig auf. Ein Zeichen dafür, daß Eingangs- und Ausgangsspannung unseres Verstärkers in Kollektorschaltung in Phase sind. Wir erinnern uns an das Schwimmerbild 145: Die beiden Schwimmer in der Brandung schwingen dort gleichzeitig auf und ab; auch sie haben die gleiche Phase.

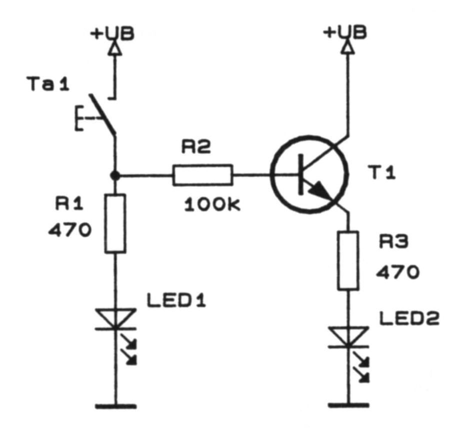


Bild 151. Prüfung der Phasenlage bei der Kollektorschaltung. Ein- und Ausgang befinden sich in Phase.

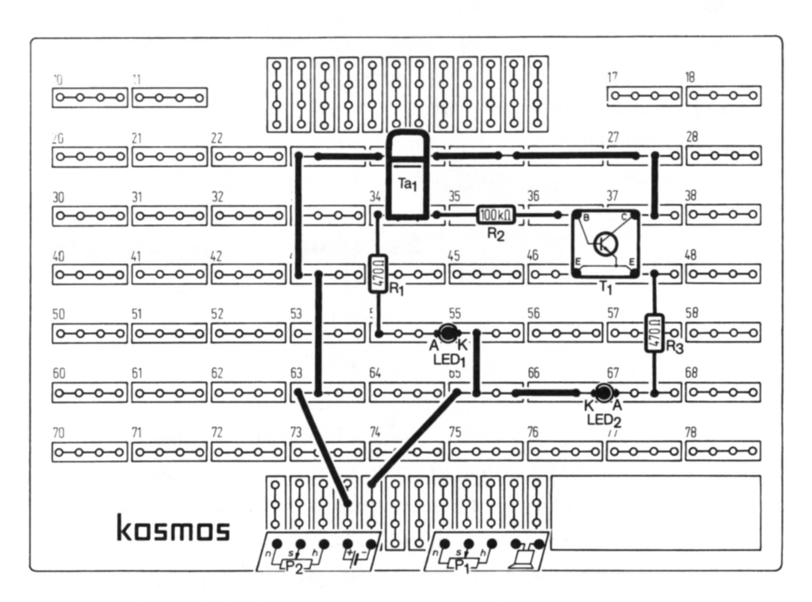


Bild 152. Aufbau zu Schaltung 151.

Emitterfolger: Verstärker ohne (Spannungs-) Verstärkung

Wir erweitern die Schaltung 151 wieder zum vollständigen Verstärker mit Poti P1 zur Arbeitspunkteinstellung und den beiden Gleichspannungssperren C1 und C2 (Aufbau 155). Das höchste der Gefühle – ich will sagen, der Verstärkung, die wir erreichen können – ist 1! D.h., die Wechselspannung ist am Ausgang nur genauso groß wie am Eingang. Die Arbeitspunkteinstellung aber ist jetzt wesentlich unkritischer als bei der Emitterschaltung. Kein Wunder, denn es handelt sich ja praktisch um eine reine Stromgegenkopplung.

Lautsprecherverstärker

Die Kollektorschaltung ist interessant für Leistungsendstufen von Verstärkern, bei denen empfindliche Vorverstärker eine genügend hohe Steuerspannung erzeugen, es aber darum geht, für den Anschluß von großen Lautsprechern auch dicke Ströme zur Verfügung zu stellen.

so groß ist, daß der gerade Teil der Kennlinie nicht mehr nutzbar ist. Beispiele dazu haben wir beim Multivibrator sowie allen Schaltanwendungen des Transistors kennengelernt. Digitalschaltungen begegnen uns in modernen Rundfunkgeräten hauptsächlich in den Baugruppen zur Frequenzeinstellung.

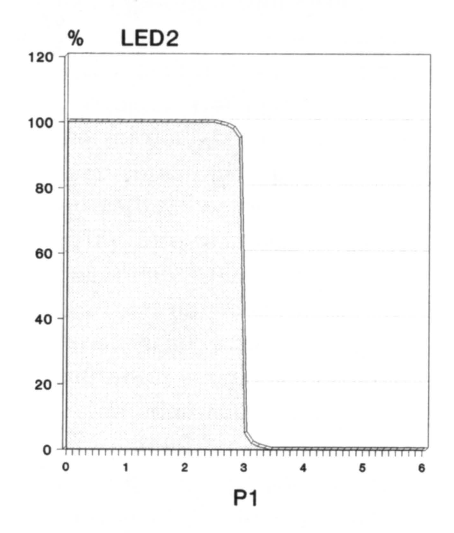


Bild 153. Die Kennlinie einer Digitalschaltung ist total steil. Dies entspricht einer extrem großen Verstärkung.

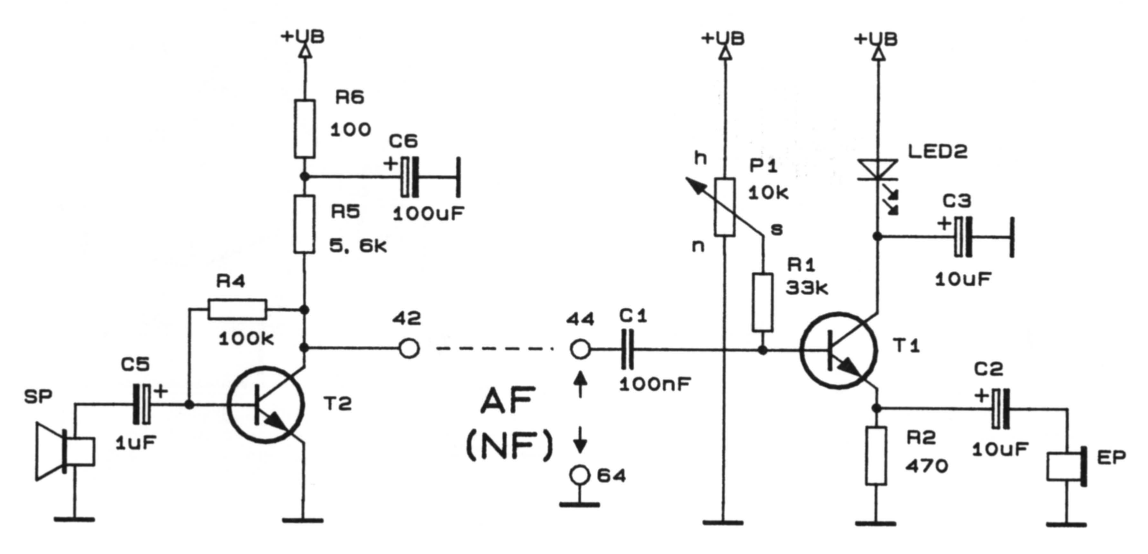


Bild 154. Ein Niederfrequenzverstärker in Kollektorschaltung.

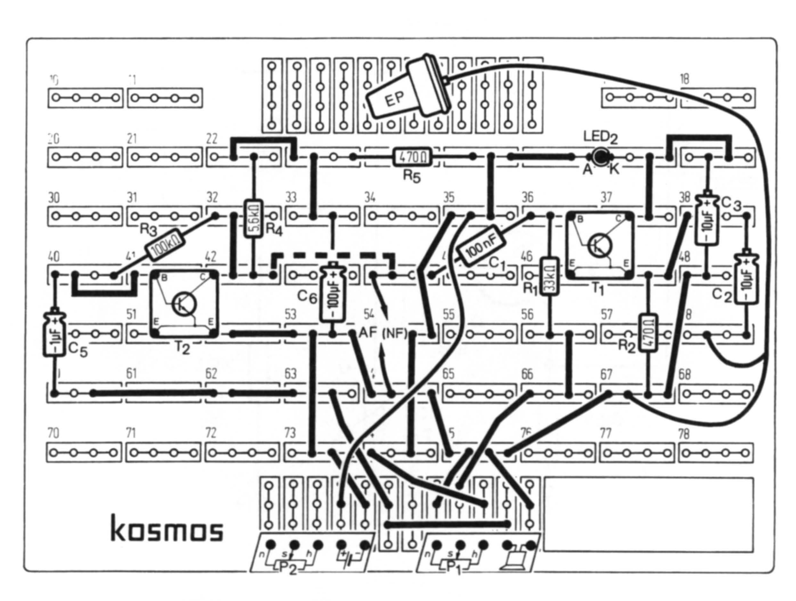


Bild 155. Aufbau zu Schaltung 154.

5.3 Basisschaltung

Bei einem Bauteil mit drei Anschlüssen, dem Transistor, gibt es logischerweise auch drei Möglichkeiten, ein Signal aus- bzw. einzukoppeln, und infolgedessen bleibt immer ein Anschluß, dessen Potential festgehalten wird. Bei der Emitterschaltung war dies der Emitter, bei der Kollektorschaltung der Kollektor. Es bleibt also noch zu untersuchen, wie das ist, wenn wir die Basis auf festem Potential halten. Der Eingang ist dann der Emitter und der Ausgang der Kollektor.

Experimente

Phasenlage: Hinaus so wie hinein

Wir überzeugen uns erneut mit Hilfe der Leuchtdioden von der Phasenbeziehung von Ein- und Ausgangssignal (Bild 157). Schaltung 156 sieht nur auf den ersten Blick verwirrend aus. Mit Hilfe



Know-how: Klirrfaktor

Wenn der gerade Teil der Kennlinie verlassen wird, wird in jedem Fall die Form der Wechselspannungsschwingung „verbogen". Abweichungen von der reinen Sinusform erzeugen bekanntlich Oberwellen, also Töne, die vorher nicht im Signal waren. In der Audiotechnik (audio = ich höre), also der Technik der Verstärkeranlagen und Lautsprecher, spricht man beim Auftreten solcher Verzerrungen vom Klirrfaktor. Der Klirrfaktor ist, vereinfacht ausgedrückt, das Verhältnis der neu entstandenen Obertöne zum Grundton.

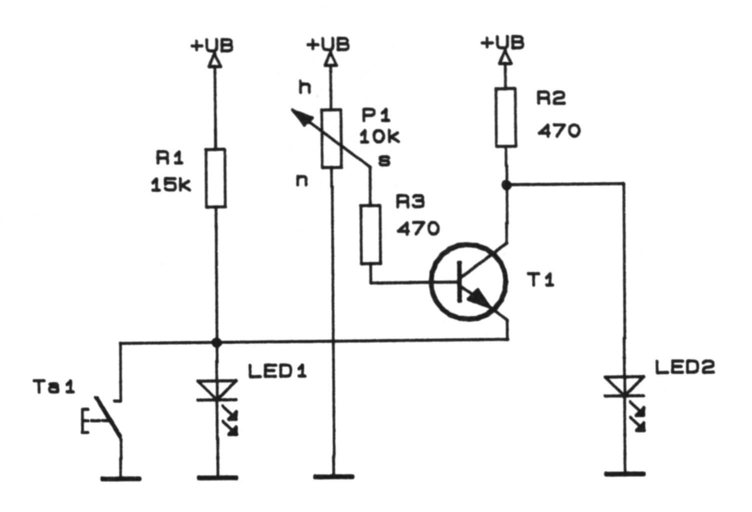


Bild 156. Phasenprüfung bei der Basisschaltung. Ein- und Ausgangssignal befinden sich wie bei der Kollektorschaltung in Phase.

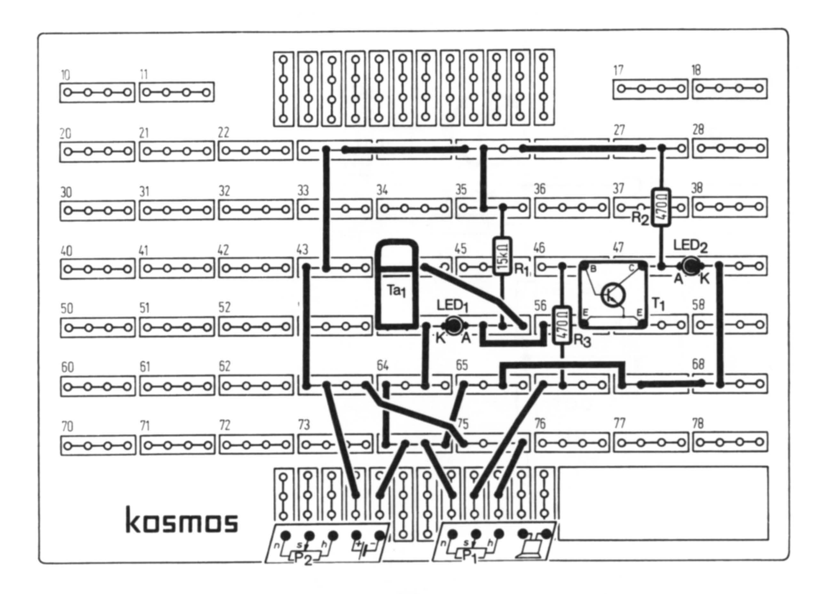


Bild 157. Aufbau zu Schaltung 156.

von P1 stellen wir wieder den Arbeitspunkt ein. Während seiner eigentlichen Aufgabe als Verstärker wird dieses Potential dann festgehalten. Am jetzigen Eingang, dem Emitter, liegt ein Widerstand, der im Ruhezustand von Ta1 den Emitter „hochzieht". Der Ausgang, der Punkt zwischen R2 und dem Kollektor, ist genauso wie bei der Emitterschaltung aufgebaut. Beim Drücken des Tasters Ta1 wird der Emitter auf Massepotential gelegt. Da die Basisspannung gleichhoch bleibt, fließt jetzt mehr Steuerstrom. Der Transistor schaltet weiter durch, und infolgedessen sinkt die Kollektorspannung ab, so daß LED2 verlöscht. Wir stellen P1 so ein, daß beide Leuchtdioden etwa gleich hell leuchten. Also liegt auch hier wie bei der Kollektorschaltung Gleichphasigkeit vor. Hohe Eingangsspannung = hohe Ausgangsspannung, niedrige Eingangsspannung = niedrige Ausgangsspannung.

Steuerung: Das Emitterniveau wird verschoben

Wir erweitern die Prüfschaltung 157 wieder zur vollständigen Wechselspannungs-Verstärkerschaltung (Schaltung 159, Aufbau 158). Zu beachten ist jetzt, daß die Basis auch wechselspan-

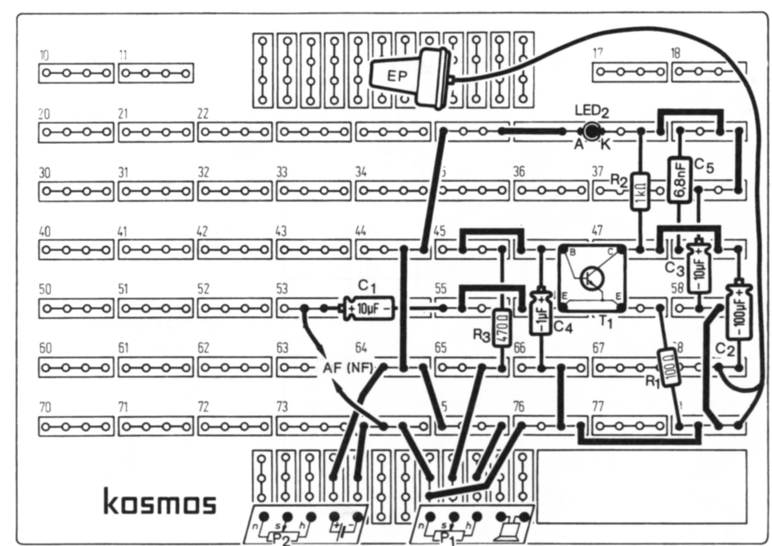


Bild 158. Aufbau zu Schaltung 159.

Know-how: Stromgegenkopplung

Die Wirkungsweise des Emitterwiderstandes ist folgende: Wenn infolge der Erwärmung des Transistors der Kollektor-Emitterstrom ansteigt, dann erhöht sich dadurch die Gleichspannung am Emitter und verringert somit die Spannungsdifferenz von Basis zu Emitter. Geringere Basis-Emitterspannung aber hat wiederum einen kleineren Steuerstrom zur Folge. Dadurch sinkt nun wieder der Kollektor-Emitterstrom ab. Dieses „Dagegenarbeiten" nennt man Gegenkopplung. Der Arbeitspunkt stabilisiert sich also und ist gegenüber Temperaturschwankungen nicht mehr so empfindlich – voilà!

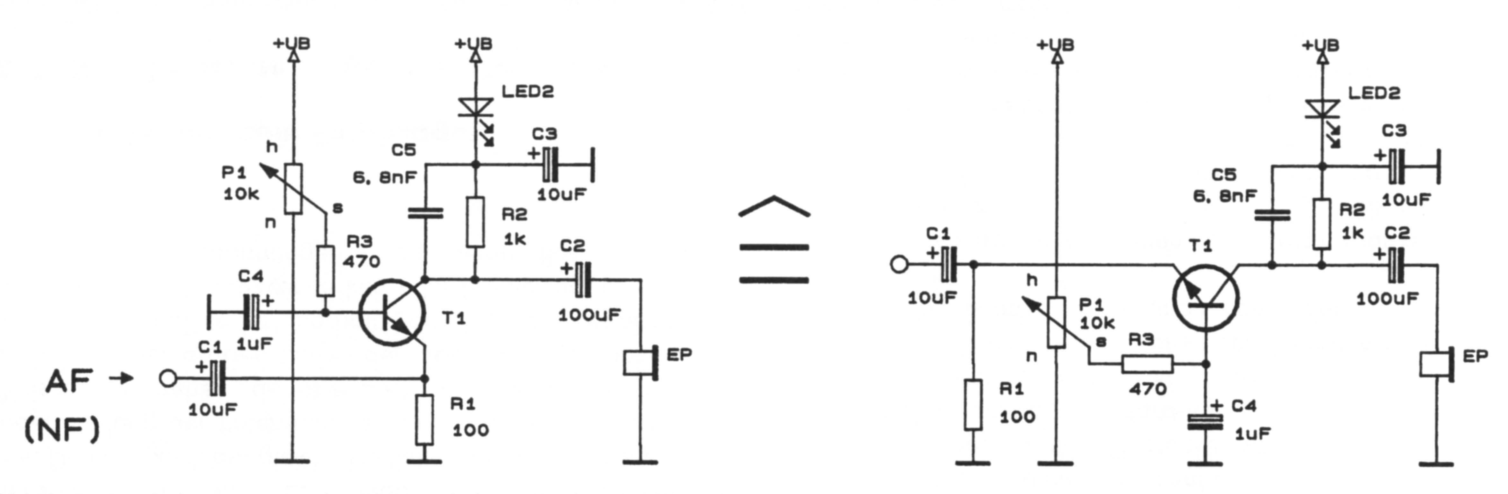


Bild 159. Ein Niederfrequenzverstärker in Basisschaltung. Beide Schaltbilder sind völlig gleichwertig. Meist wird die rechte Darstellung bevorzugt.

nungsmäßig „kalt" gemacht werden muß, C2 liefert für die Wechselspannung den nötigen Kurzschluß. Die Verstärkung entspricht etwa der der gegengekoppelten Emitterschaltung, aber hier ist die Arbeitspunkteinstellung einfacher. Die Steuerung funktioniert bei der Basisschaltung so, daß das Emitterpotential gegenüber dem Basispotential schwankt. Beim Wasserschleusenmodell des Transistors würde dies bedeuten, daß wir den Emitterausfluß hochheben bzw. absenken. Entsprechend würde weniger oder mehr Wasser ausfließen können.

5.4 Differenzverstärker: Drei Grundschaltungen in einer

Zugegeben, unser Exkurs durch die Verstärker-Grundschaltungen war ein wenig sehr theoretisch und trocken. Aber er war notwendig, um den König der Verstärker – den Differenzverstärker - verstehen zu können. Ein Differenzverstärker besteht immer aus zwei Transistoren, die gleichzeitig in allen drei Grundschaltungen betrieben werden.

Experimente

Auf den Unterschied kommt es an

Wir stellen zunächst beide Potis von Aufbau 161 in Mittenstellung (auf „3"). Durch vorsichtiges Abgleichen erreichen wir, daß beide LEDs schwach glimmen. Beim Höherdrehen von P2

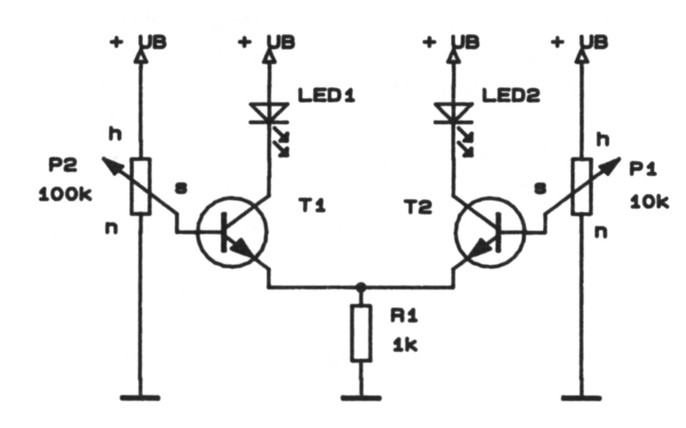


Bild 160. Ein Differenzverstärker verstärkt den Unterschied der beiden Eingangsspannungen.



Know-how: Differenzverstärker beseitigt Brummen

Denken wir an den Leitungssucher: Versteckte Leitungen ließen sich aufgrund des sie umgebenden Brummfeldes aufstöbern. Leider kommt es auch immer wieder unfreiwillig zu Brummeinstreuungen in Verstärker. Hauptsächlich sind die langen Mikrofonschnüre gefährdet, besonders wenn auch Starkstromleitungen für Scheinwerfer im Studio verlegt sind. Wenn ein Mikrofon an die beiden Eingänge eines Differenzverstärkers angeschlossen ist und auf jedem Anschlußdraht die gleiche Brummeinstreuung mitbringt, verschwindet am Ausgang des Verstärkers das Brummen auf wundersame Weise. Es hat sich aufgrund der Differenzbildung des Verstärkers selbst den Garaus gemacht. Die gewünschte AF-(NF-) Wechselspannung dagegen hat an den Anschlußdrähten unterschiedliche Phasenlage und wird ordentlich verstärkt. Hochwertige Verstär-

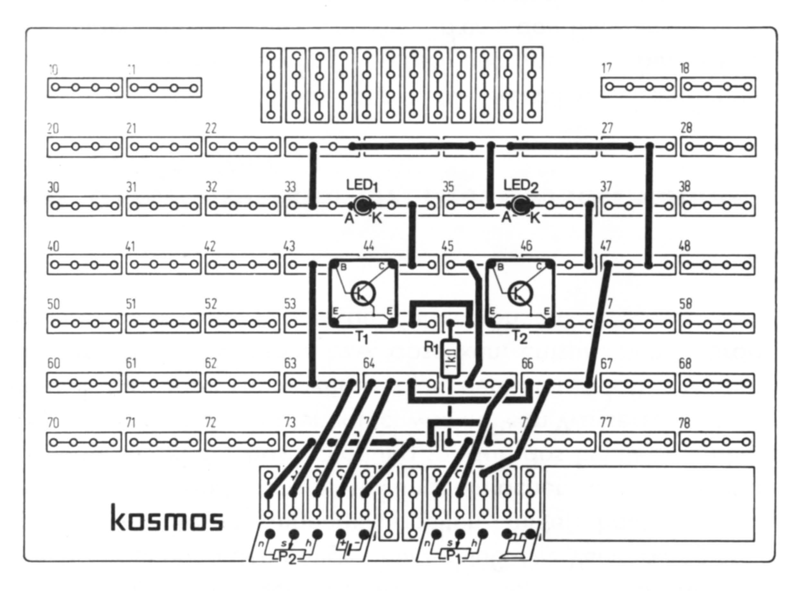


Bild 161. Aufbau zu Schaltung 160.

brennt LED1 heller, und LED2 erlischt. Beim anschließenden Höherdrehen von P1 wird LED1 wieder dunkler, und LED2 leuchtet auf. Den Abgleich auf gleiche Helligkeit können wir bei praktisch jeder Stellung der Potentiometer durchführen, z.B. wenn beide Potis auf „2" stehen oder aber auch, wenn beide auf „5" eingestellt sind. Nur an den Enden der Übertragungskennlinie, also unterhalb von „1" oder oberhalb von „5", klappt es nicht mehr. D.h., daß ein Differenzverstärker – der Name sagt es – nur den Unterschied der Spannungen an den beiden Basen verstärkt.

6. Vom Sender zum Empfänger

6.1 Der drohende Finger des Gesetzes

Fritz Gleichgültig baut einen Sender. Fliegender Aufbau, na klar! Keine Zeit für Abschirmung oder eine solide mechanische Konstruktion. „So ein Sender ist doch eigentlich gar kein Problem", denkt er! Ruckzuck die Teile zusammengewürfelt, und das Gerät funktioniert auf Anhieb. Eine Hard-Rock-Platte auf den Plattenspieler gelegt, den Plattenspieler angeschlossen, und schon hört man die Musik brüllend laut aus dem Radio im Nebenraum. Daß sein Nachbar zu diesem Zeitpunkt eigentlich lieber die Sportnachrichten hören würde, das kümmert Fritz Gleichgültig wenig. Statt der sehnsüchtig erwarteten Bundesliga-Ergebnisse hört dieser nun Hard-Rock.

Szenenwechsel: Flug LH 309 Bankok-Delhi-Frankfurt, Landeanflug über dem süddeutschen Raum, Commander Cool wählt am Funkgerät einen UKW-Kanal – "Frankfurt-Tower bitte kommen" –. Als er auf Empfang schaltet, kommt nur Rauschen, Prasseln und Knattern aus seinem Kopfhörer. Der Radio-Kompaß spielt auch verrückt. Nur mit Mühe können die Anweisungen von Frankfurt-Tower verstanden werden. Eine sichere Landung ist unter diesen Bedingungen unmöglich. Mit Hilfe eines Ersatzkanals kann dann die Maschine nach Hannover umgeleitet werden. Das Kerosin in den Tanks reicht gerade so aus. Mit Glück ist eine Katastrophe gerade noch einmal verhindert worden.

Was Fritz Gleichgültig natürlich nicht bedacht hat: sein Sender produziert Ober- und Nebenwellen! Und, wie der Zufall so spielt, die fallen genau in das Flugfunkband. Wenn auch die Beglückung des Nachbarn mit Hard-Rock noch wie ein Kavaliersdelikt klingt, bei der Störung des Flugfunkes wird es echt kriminell. So ruft auch Frankfurt-Tower sofort den Funkstörungsmeßdienst der Deutschen Bundespost an, und schon ist der gelbe Peilwagen unterwegs.

Einen Sender zusammenzubauen ist natürlich nicht sehr schwierig, aber dafür zu sorgen, daß er ordnungsgemäß arbeitet, das ist schon echte Ingenieursarbeit. Bevor ein Sender an die Antenne geht, wird er gründlich mit den teuersten und hochwertigsten Meßgeräten auf Nebenaussendungen geprüft. Nur absolut sorgfältiges Arbeiten und strenge technische Regeln garantieren einen reibungslosen und störungsfreien Funkverkehr auf allen Frequenzen. Die Deutsche Bundespost (Telekom) ist per Gesetz dazu verpflichtet, im Äther für Ordnung zu sorgen. Sie wird mit ihrem Peilwagen Fritz Gleichgültig sehr schnell aufgespürt haben und

ker bestehen in den Eingangsstufen heute praktisch ausschließlich aus Differenzverstärkern. Auch das AMP-Modul macht da keine Ausnahme.

ihn vor den Kadi bringen. Also bitte: Niemals einen Sender ohne den Segen der Telekom mit Antenne und Erde verbinden: Es kann Menschenleben kosten!
Zweifellos ist Funken ein faszinierendes Hobby. Wen würde es nicht reizen, sich die weite Welt in die Funkbude zu holen? Entweder man erwirbt ein geprüftes und zugelassenes CB-Funkgerät, oder aber man legt die Amateurfunkprüfung ab. Dann darf man sogar seine Geräte selbst bauen, denn dann ist man nämlich selbst der Fachmann.

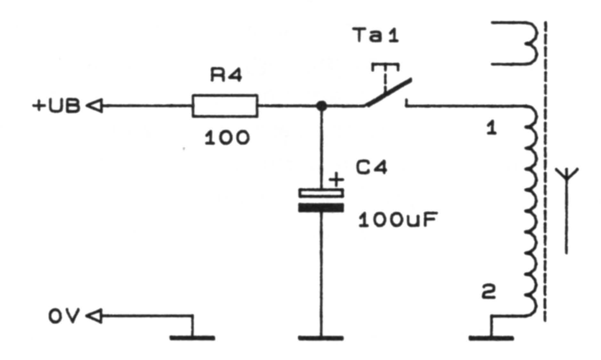


Bild 162. Ein einfacher Funkensender. Der Kondensator C1 entlädt sich beim Drücken des Tasters Ta1 schlagartig über die Spule der Ferritantenne. Auch beim Loslassen des Tasters entsteht ein Öffnungsfunken. Dadurch wird je eine kurze gedämpfte Welle ausgesendet.

6.2 Funken: ein Steinwurf in den „Äther"

Experimente

Jetzt funkt's!

Wir erinnern uns an den klassischen Versuch von Heinrich Hertz aus dem ersten Kapitel. Wir besitzen aber jetzt schon so viel Elektronikkenntnisse, daß wir den Versuch in wesentlich modernerer, komfortablerer Weise aufbauen können. Wirklich drahtlos und damit eindrucksvoller gelingt der Versuch aber nur mit einer zweiten Batterie oder besser gleich mit dem KOSMOS Netzgerät X als zweite Stromquelle. Der Versuch ist aber auch mit nur einer Batterie durchzuführen. Allerdings müssen dann sowohl Sender als auch Empfänger aus der gleichen Stromquelle gespeist werden. Dies ist aber nur ein Schönheitsfehler. An der drahtlosen Übertragung vom Sender zum Empfänger ändert dies nichts! Zur Schonung der Batterie verwenden wir jetzt im Sender einen 100-Ω-Widerstand, der bei geöffnetem Taster den Kondensator C1 langsam auflädt (Aufbaubild 165 zeigt den Sender nach Schaltung 162 und den Empfänger nach Schaltung 164 auf einer Aufbauplatte, aus einer gemeinsamen Stromquelle betrieben). Beim Drücken des Tasters Ta1 wird C1 jedoch schlagartig über die große Spule der Ferritantenne entladen. Der kurze Stromimpuls durch die Spule hat natürlich auch ein sich schnell änderndes Magnetfeld mit all seinen bekannten Auswirkungen zur Folge. Diese kurze elektromagnetische Welle wird von der Antenne des Empfängers aufgenommen und in den Schwingkreis des MF-Moduls eingekoppelt. Die Sekundärspule leitet den eingefangenen Hochfrequenzimpuls zur Germaniumdiode weiter. Die mickrige Ausgangsspannung der Diode wird vom AMP-Modul kräftig verstärkt und erscheint im Lautsprecher als unser wohlbekannter Knack. Bis zum nächsten Tasterdruck müssen wir einen Augenblick warten, weil sich der Kondensator C1 erst wieder aufladen muß. Es knackt auch mehrmals hintereinander, wenn wir den Taster nur ganz kurz drücken, wenn also C1 nicht vollständig entladen wird.

Es knackt auf allen Frequenzen

Ganz egal in welcher Stellung sich der Einstellknopf unseres Drehkondensators befindet: es knackt überall! Wir können auch den Kern der Spule vorsichtig mit einem kleinen Schraubendreher hin- und herdrehen. Die eingestellte Resonanzfrequenz des Schwingkreises hat offenbar keinen Einfluß auf die Lautstärke des Knacks. Dies läßt nur den einen Schluß zu, daß der kurze, harte Impuls unseres Senders hochfrequente Wellen auf allen



Know-how: Gedämpfte Welle – ungedämpfte Welle

Vergleichen wir den elektromagnetischen Vorgang in der Ferritantenne wieder mit einer Schaukel: Das Drücken des Tasters wirkt so, als ob sie brutal aus der Ruhelage gerissen wird; dann läßt man sie frei ausschwingen. Die Reibung der Seilaufhängung läßt die Schwingungsweite (die Amplitude) immer kleiner werden, bis die Schwingung völlig abgeklungen ist. Entsprechend strahlt die Ferritantenne nur eine kurz andauernde, gedämpfte Welle ab.

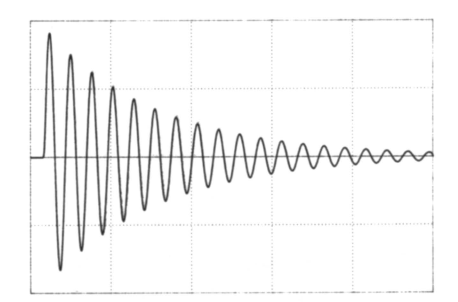


Bild 163. Bei einer gedämpften Schwingung wird die Schwingungsweite (die Amplitude) immer kleiner, bis die Schwingung schließlich verebbt.

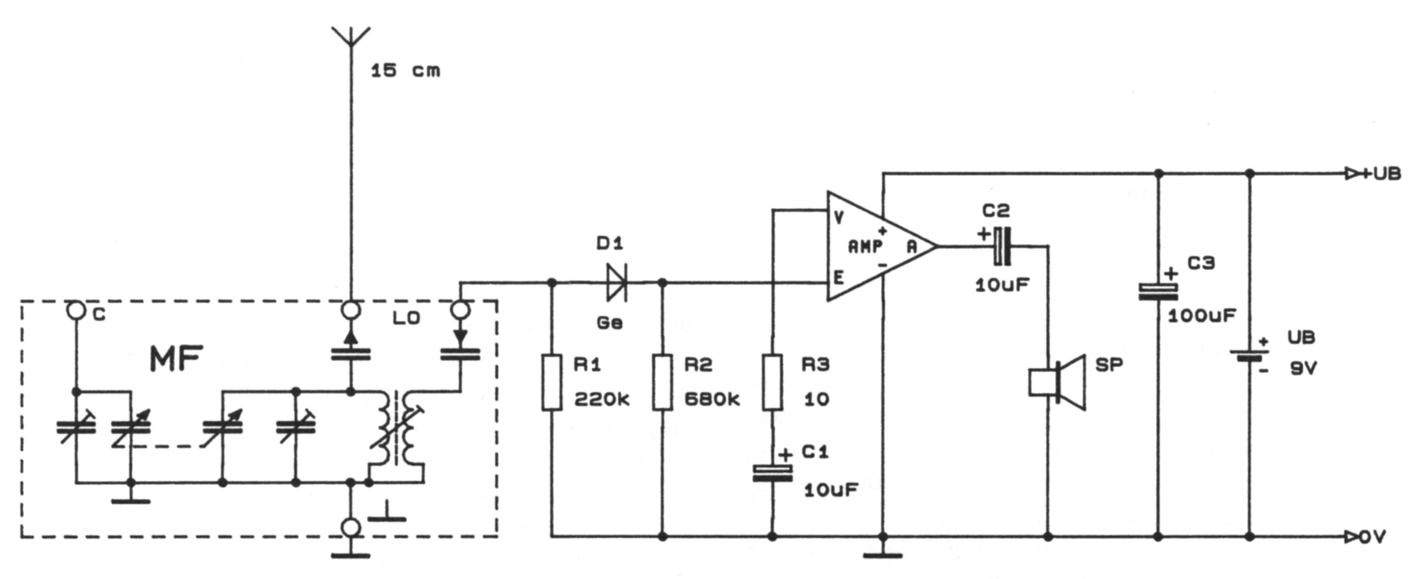


Bild 164. Ein verbesserter Empfänger für unsere Sendeversuche. Das AMP-Modul verstärkt die von der Diode gelieferten schwachen Spannungen gewaltig.

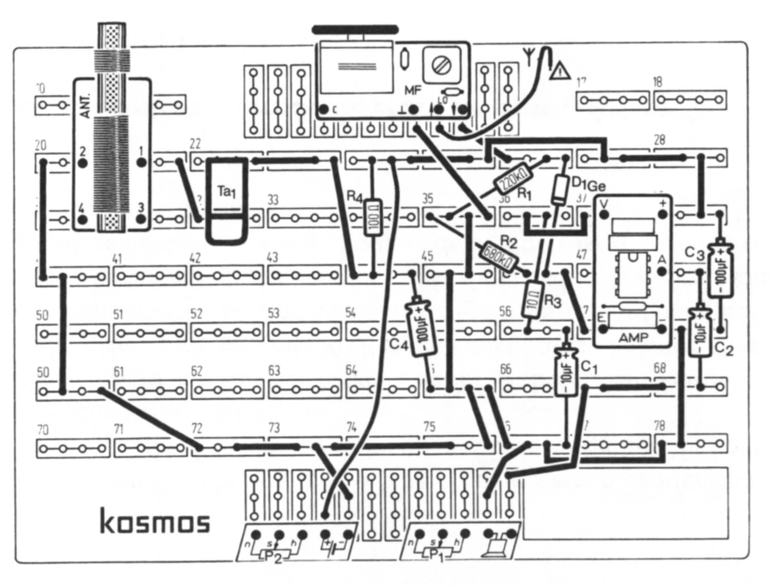


Bild 165. Aufbau zu den Schaltungen 162 und 164.

Frequenzen ausstrahlt. Es handelt sich, wie bei einem Gewitter, um einen breitbandigen Störer. Bei manchen Einstellungen des Schwingkreises sind auch einige Rundfunksender zu hören. Im Gegensatz dazu arbeiten diese auf ganz bestimmten Frequenzen und verschwinden wieder im Rauschen, wenn der Drehko weitergedreht wird.

Zur Darstellung der Schwingungen benutzt der Rundfunk- und Fernsehtechniker ein bestimmtes Meßgerät: ein Oszilloskop, frei übersetzt: ein Schwingungsbetrachter (Bild 167). Ein Oszilloskop funktioniert im Prinzip wie unser Papierstreifen, der unter dem schwingenden Schreibstift durchgezogen wird. Anstelle des Schreibstiftes zeichnet beim Oszilloskop ein Elektronenstrahl den Verlauf der Schwingung auf den Bildschirm. Wir werden ab jetzt Schwingungen mit dem Oszilloskop betrachten.

Um ungedämpfte Wellen zu erzeugen, muß man der Schwingung immer wieder – im richtigen Augenblick! – einen kleinen Schubs geben, so daß die Amplitude stets gleich groß bleibt.

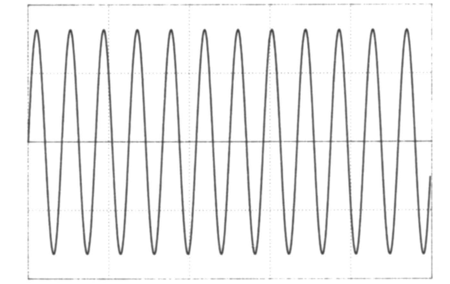


Bild 166. Bei einer ungedämpften Schwingung bleibt dagegen die Schwingungsweite immer gleich.

Bei einer Schaukel ist das kein Problem, aber bei einem Hochfrequenzschwingkreis muß das einige hunderttausend- bis millionenmal pro Sekunde geschehen! Naturgemäß ist das eine äußerst schwierige Angelegenheit. Die ersten Funkpioniere, besonders G. Marconi, mußten sich da zunächst anders helfen. Marconi benutzte einen Funkeninduktor, der sich ähnlich wie eine Hausklingel mit Hilfe eines Hammerkontaktes zehn- bis zwanzigmal in der Sekunde

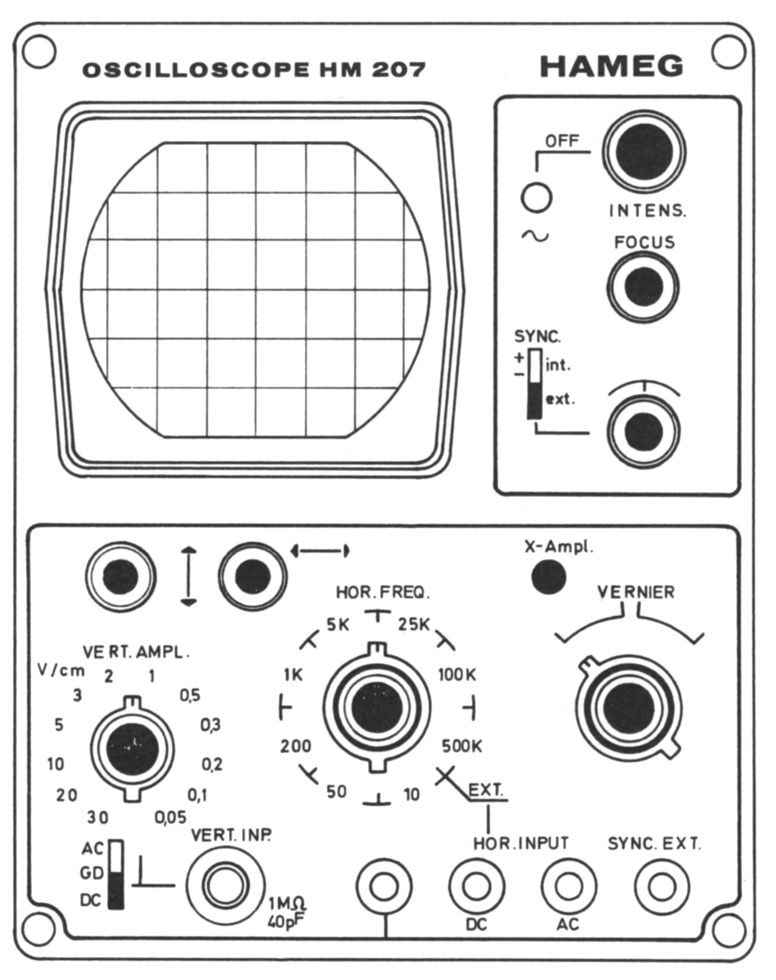


Bild 167. Ein Oszilloskop macht Schwingungen sichtbar.

Kaiserliches Funktelegramm

Als 1899 Kaiser Wilhelm II. von Bord seiner Yacht an seine angetraute Kaiserin ein Telegramm absetzen wollte, verweigerte die Landstation der Marconi Wireless-Telegraph-Co. die Übermittlung.

Zornentbrannt versammelte der Kaiser nach seiner Rückkehr die besten Wissenschaftler und Kaufleute um sich, um der deutschen Funktechnik zu mehr Weltgeltung zu verhelfen. Es begann eine stürmische Entwicklung: Die bis jetzt rivalisierenden Firmen AEG und Siemens gründeten gemeinsam die „Gesellschaft für Drahtlose Telegraphie m.b.H. System Telefunken". Dort entwickelte Max Wien im Jahre 1905 den tönenden Löschfunkensender. Zwar arbeitete auch dieser Sender mit einer schnellen Folge gedämpfter Schwingungen, doch folgten hier die Schwingungszüge so rasch aufeinander (mit ca. 1000 Hz), daß im Empfänger ein angenehmer, musikalischer Ton zu hören war (Bild 168). Den eigenartigen Namen verdankt dieser Sender der Tatsache, daß ein Funken unmittelbar nach seinem Entstehen wieder gelöscht wurde, um sofort darauf erneut gezündet zu werden.

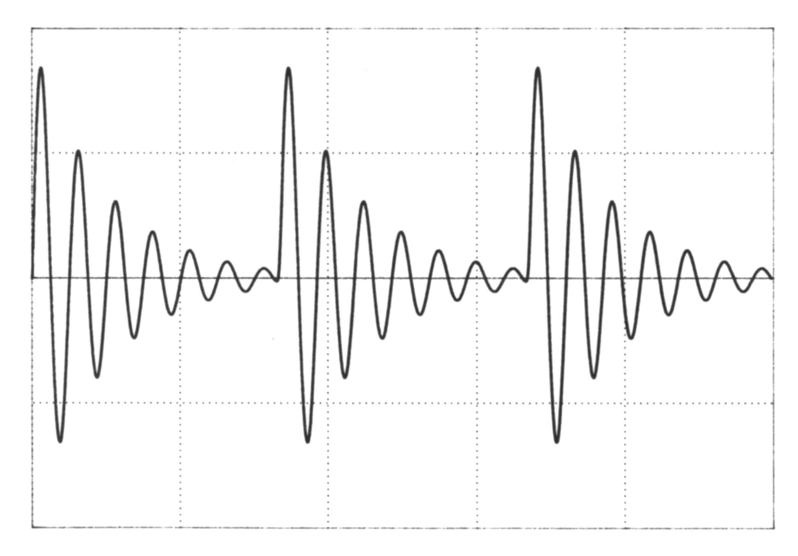


Bild 168. Eine rasche Folge gedämpfter Schwingungen erzeugt im Empfänger einen Ton. Das ist das Schwingungsbild des historischen Löschfunkensenders.

selbst unterbrach. Dadurch wurden zehn bis zwanzig gedämpfte Schwingungszüge in der Sekunde abgestrahlt. Im Empfänger hörte sich dies wie ein Knatterton an. Immerhin konnte man mit diesem Ton bereits morsen.

Wir simulieren einen „Tönenden Löschfunkensender"

Das Arbeiten mit hohen Spannungen ist gefährlich und aufwendig. Wir benutzen modernste Elektronik, um den historischen Löschfunkensender zu simulieren. Ein alter Bekannter, der Multivibrator (Bild 169, Sender und Empfänger werden in Aufbau 170 aus einer gemeinsamen Batterie betrieben) unterbricht den Strom durch die Ferritantenne in rascher Folge und ersetzt wieder einmal den mechanischen Kontakt. Im Empfänger ist der musikalische Morseton gut zu hören. Wenn keine zweite Batterie bzw. zusätzliches Netzgerät verwendet wird, muß zur Entkopplung ein RC-Glied, R4 und C4, zwischen Sender und Empfänger geschaltet werden. Die Entkopplung bewirkt, daß die Tonfrequenz des Multivibrators nicht über die gemeinsame Stromversorgungsleitung zum Empfänger gelangen kann.

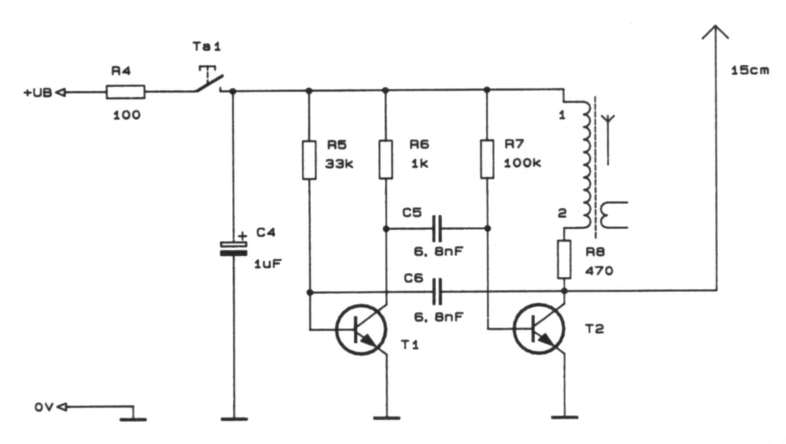


Bild 169. Ein Multivibrator schaltet selbsttätig den Strom durch die Spule ein und aus. So würde man heute einen tönenden Löschfunkensender aufbauen. Beim historischen Vorbild dagegen verwendete man eine ganze Kette kleiner Funkenstrecken.

6.3 Rückkopplung: Eine Schwingung verstärkt sich selbst

Wenn auch der tönende Löschfunkensender für die Morseübertragung schon recht brauchbar war, so ist das Gelbe vom Ei doch die Erzeugung ungedämpfter Hochfrequenzwellen. Den Stein des Weisen fand Alexander Meißner im Jahre 1913, nachdem zwei Jahre zuvor Robert von Lieben die Elektronenröhre entwickelt hatte, beide bei der kaiserlichen Wunschfirma! Obwohl eine Röhre nach einem anderen physikalischen Prinzip arbeitet, so können wir doch die Versuche genauso mit Transistoren durchführen; schaltungstechnisch macht es nämlich keinen großen Unterschied. Erinnern wir uns an den Rückkopplungsversuch, den wir mit dem Seismometeraufbau ausführten: Der grundsätzliche Trick bestand darin, dem Eingang eines Verstärkers wieder einen kleinen Teil des Ausgangssignals zuzuführen. Genau das war das Patent von Alexander Meißner.

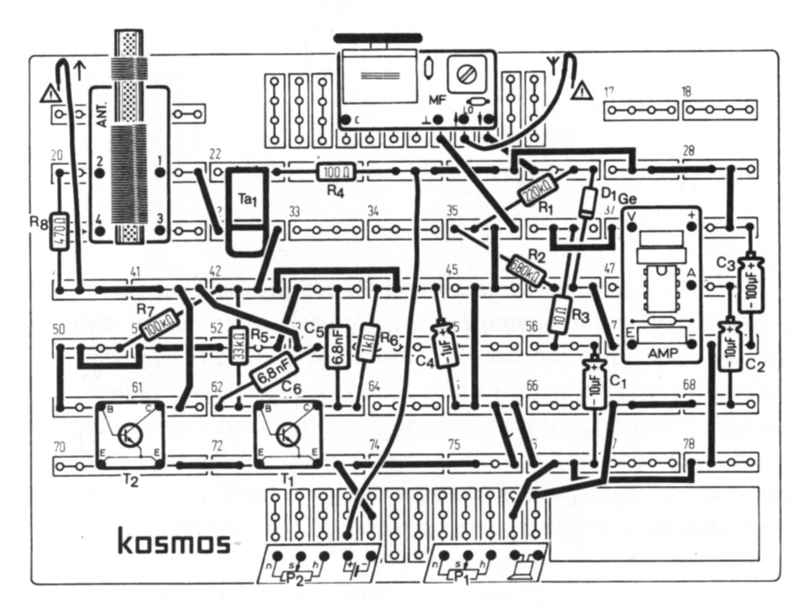


Bild 170. Aufbau zu Schaltung 169.



Know-how: Die Diode macht die Hochfrequenz hörbar

Wozu dient eigentlich die Diode zwischen Empfängerschwingkreis und Verstärker? Vom Schwingkreis kommt astreine Hochfrequenz, die, selbst wenn sie unser AMP-Modul verstärken könnte, unhörbar wäre. Die Membrane unseres Lautsprechers könnte den schnellen Schwingungen gar nicht folgen. Die Diode schneidet den negativen Teil der hochfrequenten Schwingung ab (Bild 171).

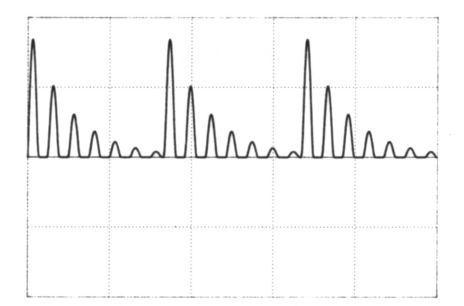


Bild 171. Eine Diode läßt nur eine Halbwelle passieren. Unser Ohr kann die hochfrequenten Schwingungen nicht wahrnehmen.

Sie liefert so an den Verstärker eine pulsierende Gleichspannung (Bild 174).

Experimente

Sender für ungedämpfte Wellen: Meißner-Oszillator

Wie wir wissen, benötigen wir zunächst einen Verstärker, um die Verluste auf dem Rückkopplungsweg – der Fachmann sagt Rückkopplungsnetzwerk dazu – ausgleichen zu können. Wir verwenden unseren Allround-Standardverstärker mit der Spannungsgegenkopplung, ein alter Bekannter also (Schaltbild 172, Aufbau 173). Als Rückkopplungsnetzwerk dient das LC-Modul. Das an Punkt 6 des LC-Moduls herauskommende Signal wird über C1 wieder dem Eingang des Verstärkers zugeführt. Vor Versuchsbeginn drehen wir den Kern der Spule so weit wie möglich nach oben. Aber bitte nicht fest anknallen! Dadurch wird die Induktivität – so nennt man die elektrische Wirkung von Spulen – verkleinert und die Resonanzfrequenz des Schwingkreises so weit wie möglich nach „oben“ geschoben. Als Empfänger benutzen wir zunächst ein kleines Taschenradio oder ein anderes Radio mit Mittelwellenbereich. Wir stimmen das Radio auf etwa 550 kHz ab (auf der Skala steht meist nur 5,5!). Wir halten das Radio in die Nähe des als Antenne wirkenden 15-cm-Drahtstückes und drücken auf den Taster des Oszillators. Dann drehen wir vorsichtig den Abstimmknopf des Radios hin und her. Wenn das Radio eine Abstimmanzeige hat (Instrument oder LED), können wir die Frequenz des Oszillators leichter finden. Insbesondere dann, wenn wir rhythmisch auf den Taster des Oszillators drücken. Das Ergebnis ist aber eigentlich eher enttäuschend: Außer einer Änderung des Rauschens oder evtl. einem leichten Pfeifen, wenn andere Rundfunksender in der Nähe sind, hören wir fast nichts. Allenfalls mit der Abstimmanzeige lassen sich die Aussendungen unseres Meißner-Oszillators nachweisen. Das soll der Fortschritt sein?

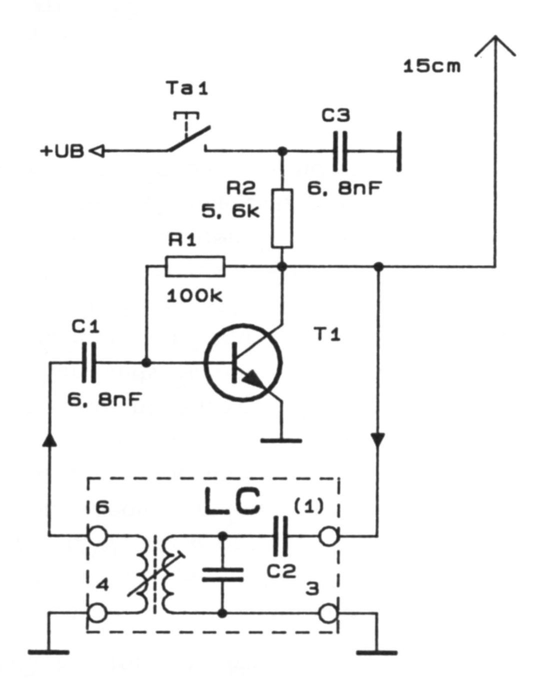


Bild 172. Ein Oszillator für ungedämpfte Schwingungen entsteht, wenn das Ausgangssignal eines Verstärkers (T 1) wieder zu seinem Eingang zurückgeführt (rückgekoppelt) wird. Ein Meißner-Oszillator benutzt zur Rückkopplung einen Übertrager.

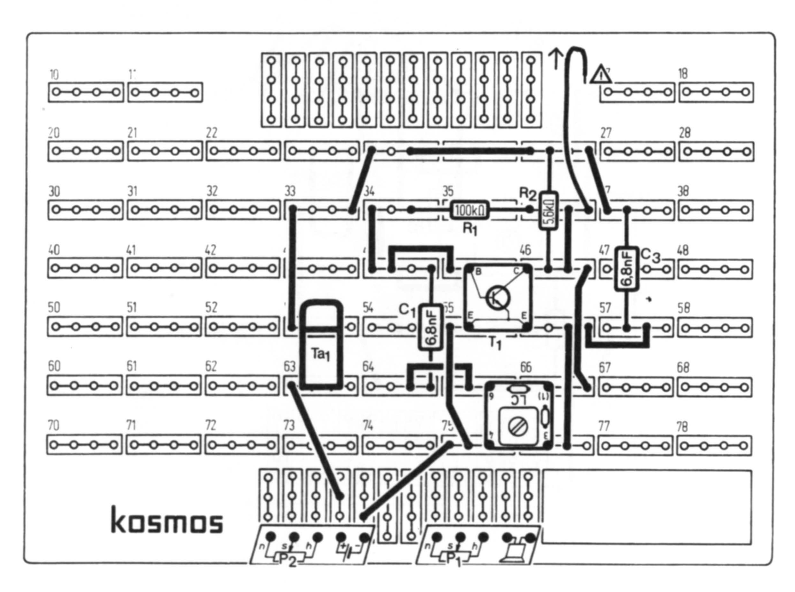


Bild 173. Aufbau zu Schaltung 172.

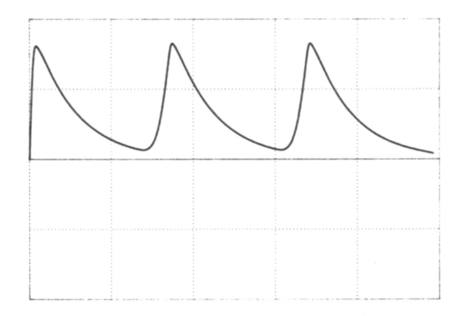


Bild 174. Wir hören nur die Frequenz der einhüllenden Schwingung, die der Folgefrequenz der Löschfunken entspricht.

Diese wird nach altbekannter Weise verstärkt und als tonfrequente Wechselspannung dem Lautsprecher zugeführt, nachdem sie durch C2 vom Gleichspannungsanteil getrennt wurde (Bild 175).

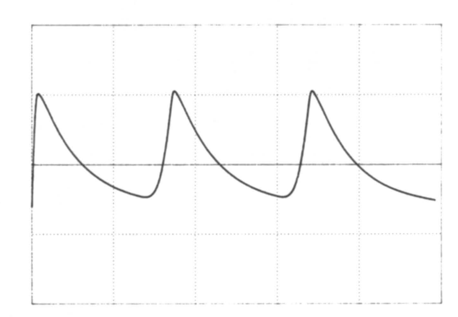


Bild 175. Ein Kondensator in Reihe trennt den Gleichspannungsanteil ab, so daß wir die Niederfrequenz wie gewohnt verstärken können.

Meißner-Oszillator mit „Modulation"

Wir wollen von unserem Oszillator endlich etwas hören. Die Ein- und Ausschaltknackse beim Tasten des Oszillators habt ihr sicher schon bemerkt. Wenn wir ganz schnell tasten könnten, würden diese Knackser wieder zum Ton werden. Aber die niedrigste Frequenz, die unser Gehör noch wahrnehmen kann, sind etwa 16 Hz, und keiner von euch wird in der Lage sein, 16mal pro Sekunde ein- und auszuschalten. Wir bedienen uns deshalb wieder eines technischen Kniffs (Schaltbild 176, Aufbau 177). Wir entfernen die stabilisierende Spannungsgegenkopplung, indem wir den Widerstand R1 vom Kollektor trennen und ihn statt dessen an den Schleifer des Potis P2 legen. Mit P2 kann nun die Basisspannung eingestellt werden. Wir stellen P2 zunächst auf etwa „3" ein. Grundsätzlich sollte sich nichts Wesentliches beim Empfang des getasteten Senders verändert haben. Mit dem Senderwahlknopf des Radios stellen wir noch einmal sicher, daß dieser richtig auf den Sender abgestimmt ist. Während wir den Taster festhalten, drehen wir P2 langsam nach unten. Unterhalb von etwa „1,5" hören wir im Empfänger plötzlich ein Pfeifgeräusch. Mit P2 können wir geringfügig die Tonhöhe verändern. Wir stellen sie auf einen angenehmen Wert ein. Jetzt können wir richtig mit Tönen morsen. Ohne die Spannungsgegenkopplung reißt bei knapp eingestellter Basisvorspannung die Schwingung immer wieder ab und unterbricht die Aussendung. Die Diode des Empfängers liefert also Gleichstromimpulse an den AF-(NF-)Verstärker ab. Da die Schwingung sehr häufig abreißt – mehr als tausendmal pro Sekunde –, erscheinen die Gleichstromimpulse als Ton. (Know-how S. 82)

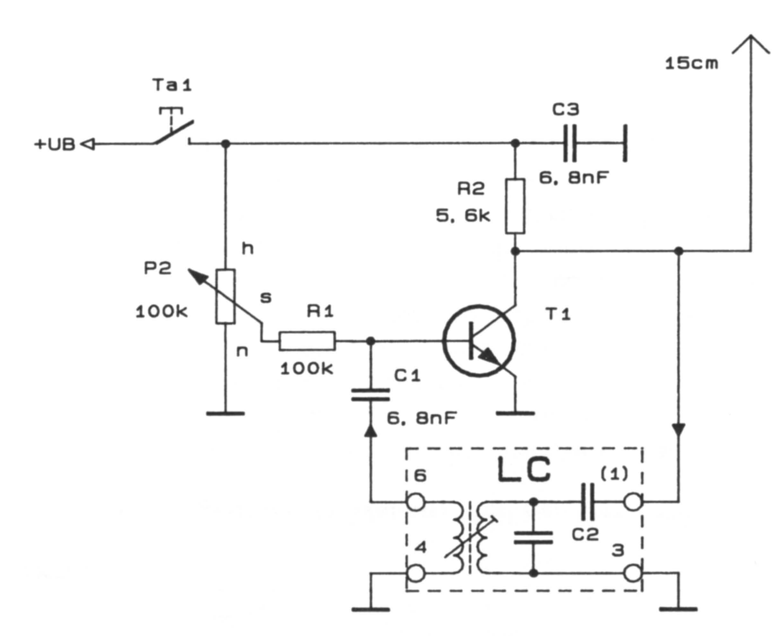


Bild 176. Zwei Oszillatoren in einem: Die Schaltung schwingt auch niederfrequent und unterbricht dadurch rhythmisch die Aussendung der Hochfrequenz.

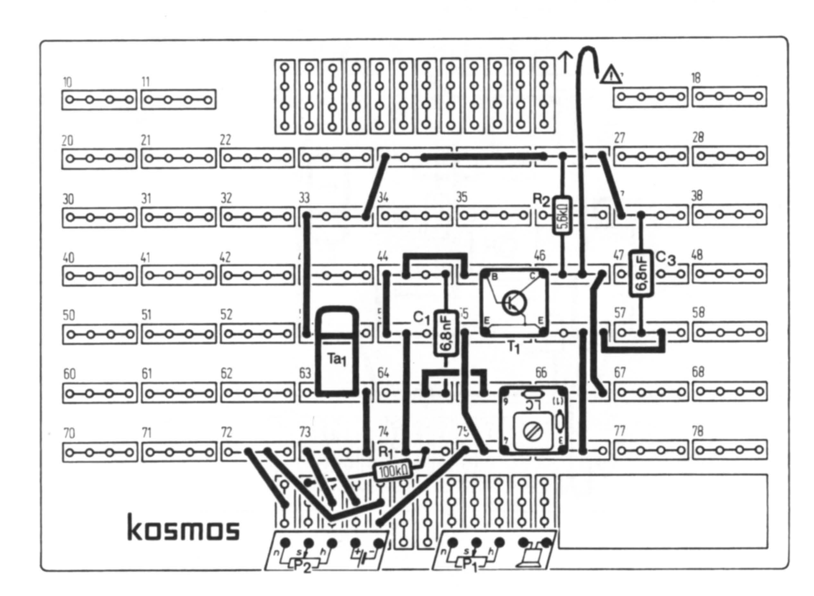


Bild 177. Aufbau zu Schaltung 176.

Die Richtung entscheidet: Phasenbedingung

Bei unveränderter Einstellung des Potis P2 vertauschen wir jetzt die Anschlüsse 6 und 4 des LC-Moduls. Beim Einschalten des Sen-



Know-how: Ungedämpfte Welle = Träger

Bei einem Sender für ungedämpfte Wellen ist jede Amplitude gleich hoch, d.h. hinter der Diode des Empfängers steht eine reine Gleichspannung an. Und die ist bekanntlich unhörbar. Eine solche kontinuierliche Welle gemäß Bild 166 bezeichnet man mit dem englischen Namen Continuous Wave oder kurz CW. Und gerade weil eine kontinuierliche Welle selbst kein Geräusch produziert, ist sie ideal als Träger für Nachrichten aller Art geeignet. Der Nachrichteninhalt wird der Trägerwelle aufgebürdet. Die Hochfrequenz hat dann lediglich die Rolle des Lastesels, eben des Trägers übernommen. Die einfachste und älteste Form der elektrischen Nachrichtenübertragung ist das Morsen, d.h. einfach den Träger ein- und auszuschalten (Bild 178).

ders hören wir absolut nichts. Deswegen können wir die Änderung auch gleich wieder rückgängig machen. Sie sollte nur zeigen, daß es zum Anfachen der Schwingung durch Rückkopplung noch einer weiteren Bedingung bedarf. Die uns schon bekannte Bedingung, daß der Verstärker die Verluste des Rückkopplungsnetzwerkes ausgleichen muß, nennt man Amplitudenbedingung. Doch die rückgekoppelte Spannung darf nicht wie bei der Gegenkopplung der Verstärkerspannung entgegenwirken, sondern muß diese unterstützen. Deswegen heißt diese Art der Rückkopplung auch Mitkopplung. Da unser Verstärker bekanntlich die Phase um 180 Grad dreht, muß auch der Hochfrequenzübertrager so angeschlossen werden, daß dieser ebenfalls um weitere 180 Grad dreht. Da man bekanntlich bei einer Drehung um 360 Grad wieder in dieselbe Richtung wie zuvor blickt, ist damit die Phasenbedingung für die Rückkopplung (Mitkopplung) erfüllt, und unser Oszillator schwingt an.

Oberwellenschleuder

Ein Sender ist kein Kinderspielzeug! Wir wollen uns jetzt einen Eindruck von der Gefährlichkeit unserer Versuche verschaffen. Unser einfacher Oszillator arbeitet nämlich keineswegs ideal. Er sollte uns nur helfen, das Meißnersche Rückkopplungsprinzip verstehen zu lernen. Bei ganz herausgedrehtem Kern des LC-Moduls (kleinste Induktivität) sendet der Oszillator bei etwa 550 bis 600 kHz. Dort ist auch mit dem Radio der beste Empfang. Der Oszillator „bläst" aber auch satte Oberwellen ab. Wir stellen das Radio jetzt auf das Doppelte von 550 kHz nämlich 1,1 MHz ein (auf der Skala steht oft 11!). Wir müssen sicherlich ein bißchen hin- und herdrehen, denn so genau stimmt weder das LC-Modul noch die Skala des Radios. Aber dann können wir ganz deutlich die Morsesignale unseres Senders noch einmal hören. In den meisten Fällen wird es sogar möglich sein, bei der dritten Oberwelle auf 1,65 MHz noch etwas zu hören. Wir betreiben also eigentlich eine Art elektronischer Umweltverschmutzung. **Deshalb bitte auf gar keinen Fall den Oszillator an eine größere Antenne anschließen!!**

Dämpfung im Quadrat der Entfernung

Zum Glück ist uns die Natur wohlgesonnen, sonst dürften wir diese Versuche überhaupt nicht durchführen. Wir entfernen bei gedrückter Sendetaste langsam das Radio vom Versuchsaufbau, nachdem wir es wieder auf die Grundwelle zwischen 550 und 600 kHz eingestellt haben. Besonders gut gelingt der Versuch, wenn das Radio eine Abstimmanzeige mit einem Meßinstrument hat. Wir werden feststellen, daß die Stärke des einfallenden Signals – die Feldstärke – zunächst langsam und dann schnell abnimmt. Bereits in einem Meter Entfernung ist nichts mehr zu hören. Der Ausgangspunkt der abgestrahlten Welle ist unser Versuchsaufbau, hauptsächlich das 15-cm-Drahtstück. Von dort aus breitet sich die Welle kugelförmig in alle Richtungen aus. Je weiter sie sich vom Versuchsaufbau entfernt, desto mehr Rauminhalt muß sie auffüllen, desto weniger Energie steht an einem bestimmten Punkt für die Empfangsantenne zur Verfügung. Die Feldstärke eines Senders nimmt genau wie die Helligkeit einer Lampe mit dem Quadrat der Entfernung ab.

Der Begründer der drahtlosen Nachrichtentelegrafie, G. Marconi, benutzte hochfrequente Wellen für eine Funkfernsteuerung als erste Anwendung dieser neuen Technik. Wie von Geisterhand ließ er ohne Drahtverbindung im Nebenraum eine Klingel ertönen.

Funkfernsteuerung

Nachrichtensatelliten werden über eine Entfernung von 36.000 km von der Bodenstation aus bedient; Bastler haben ihre Modellflugzeuge dank Funkfernsteuerung auch drahtlos fest im Griff.
Als Sender dient wiederum unser bereits bewährter Meißner-Oszillator. Der Empfänger erhält einen Schwingkreis, bestehend aus der Ferritantenne und dem zweiten, bis jetzt ungenutzten Plattenpaket des Drehkos auf dem MF-Modul (Anschluß C). Der MOSFET bildet eine weitere Verstärkerstufe (Bilder 179 und 180). Da er in der Lage ist, leistungslos zu verstärken, kann er direkt an das „heiße" Ende des Schwingkreises angekoppelt werden.

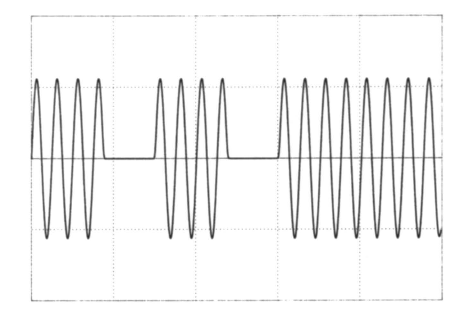


Bild 178. Beim Morsen wird die ungedämpfte Trägerwelle rhythmisch unterbrochen.

Um die getastete Trägerwelle im Empfänger wieder hörbar zu machen, sind allerdings dann noch weitere Maßnahmen notwendig. Darüber später mehr. Funker nennen das Morsen mit der Trägerwelle ebenfalls CW. Dies ist allerdings nicht ganz richtig, denn kontinuierlich ist die Welle nur während der Dauer des Tasterdrucks, ansonsten ist sie ja eigentlich unterbrochen.



Know-how: Schwingkreise sieben die Resonanzfrequenz heraus (zu Bild 176)
Das LC-Modul besteht aus einem kompletten Schwingkreis, einem weiteren Koppelkondensator

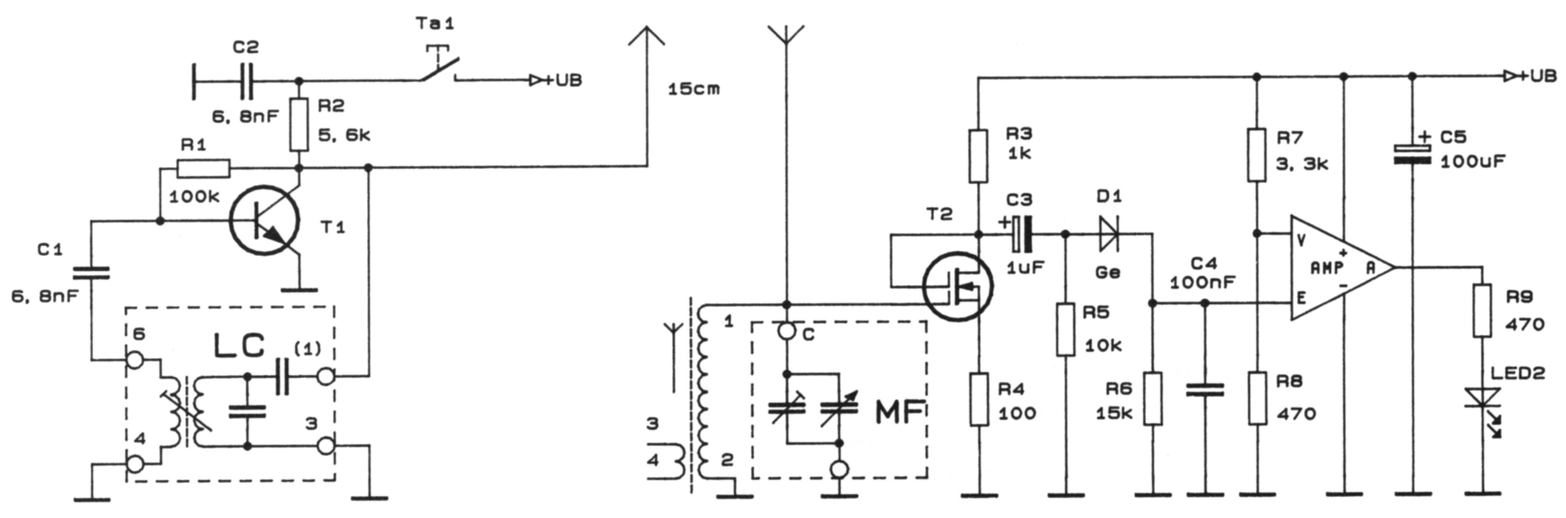


Bild 179. Fernsteuerempfänger. Die Leuchtdiode LED2 zeigt durch ihr Leuchten das Eintreffen eines Hochfrequenzsignals an.

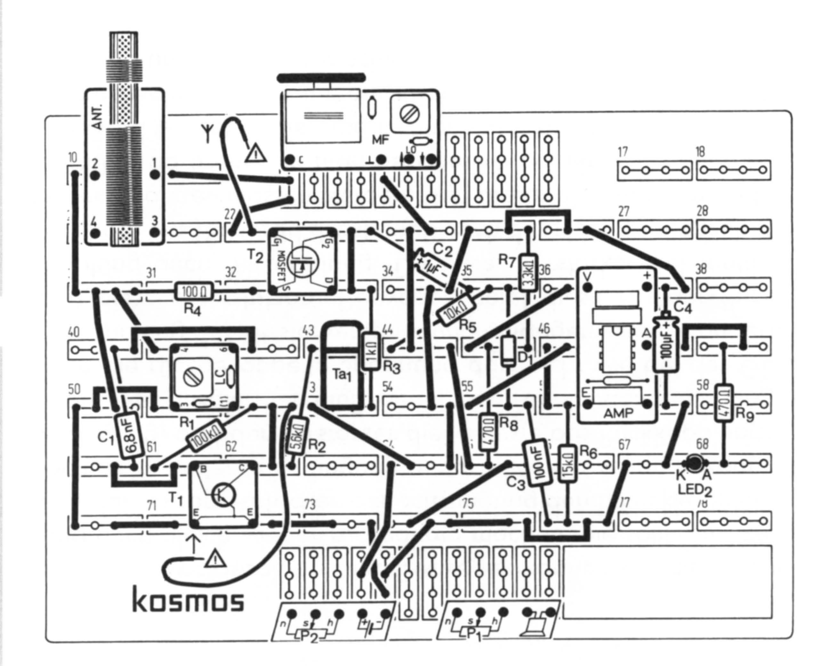


Bild 180. Aufbau zu Schaltung 179.

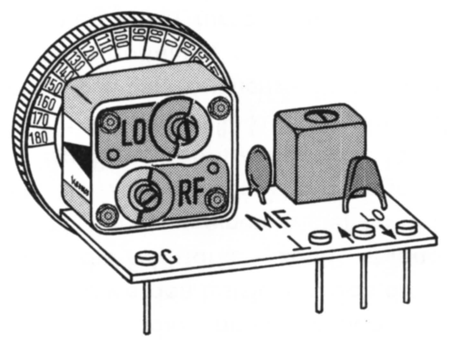


Bild 181. Die Trimmkondensatoren sind mit dem Drehko zusammen in einem Gehäuse untergebracht. Sie sind dann auf größte Kapazität eingestellt, wenn die halbkreisförmigen Platten ganz über die fest montierten gedreht sind. Für diesen Versuch genügt es, nur den unteren einzustellen.

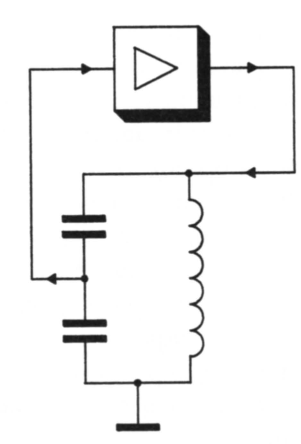


Bild 182. Blockschaltbild eines Colpitts-Oszillators. Colpitts benutzte zur Rückkopplung einen kapazitiven Spannungsteiler, also zwei Kondensatoren.

(C2) und einer Koppelspule, die an den Anschlüssen 6 und 4 herausgeführt ist. Die Koppelspule bildet mit dem Schwingkreis so etwas wie einen Hochfrequenztransformator. Das Ausgangssignal des Verstärkers wird dem Schwingkreis über C2 zugeführt. Der Schwingkreis wirkt wie ein Schwingungssieb: Die Resonanzfrequenz des Schwingkreises wird bevorzugt weitergegeben, alle anderen Frequenzen werden dagegen gedämpft (Bild 183). Deshalb schwingt der Oszillator auf der Resonanzfrequenz des Schwingkreises.

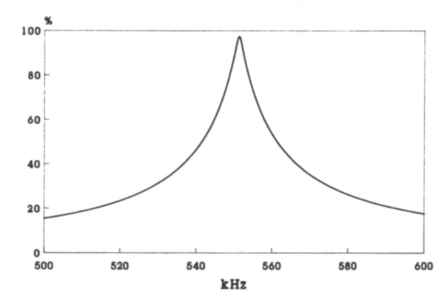


Bild 183. Die Resonanzfrequenz des LC-Moduls wird ungehindert durchgelassen. Alle anderen Frequenzen dagegen werden gedämpft.

Der Rest der Schaltung ist ein alter Hut: Die Germaniumdiode richtet die hochfrequenten Impulse gleich, und der Kondensator C4 sorgt für die notwendige Glättung. Das AMP-Modul arbeitet als Gleichspannungsverstärker und bedient an seinem Ausgang die Leuchtdiode LED2. Anstelle der LED kann hier das KOSMOS Netzschaltgerät X angeschlossen werden.
Damit die Sendefrequenz des Oszillators auch ganz bestimmt in den Empfangsbereich fällt, drehen wir den dem Drehko parallel geschalteten Trimmkondensator ganz hinein. Es handelt sich dabei um den unteren der beiden Trimmer. Er ist dann auf die größte Kapazität eingestellt, wenn die halbkreisförmigen, drehbaren Platten ganz über den fest angebrachten stehen (Bild 181). Mit dem großen Abstimmkopf stellen wir unseren Empfänger bei gedrückter Sendetaste auf maximales Signal ein. Die Grundwelle finden wir wieder am Anfang der Skala. Eventuell müssen die beiden Antennenstäbchen ganz dicht zueinandergebogen werden. Die richtige Abstimmung ist am Aufleuchten der Leuchtdiode zu erkennen. Wir können die Leuchtdiode also drahtlos funkferngesteuert aus- und einschalten. „Fern"steuerung ist gut! Unser Sender reicht ja nur wenige Zentimeter weit! Aber wie wir wissen, können wir sehr froh darüber sein, denn damit ist jegliche Gefährdung des Funkverkehrs ausgeschlossen! Flugzeuge werden wegen uns nicht abstürzen!

Meißner, Colpitts, Hartley, Clapp und Co.

Nachdem Alexander Meißner das Rückkopplungsprinzip entdeckt hatte, explodierte die weitere Entwicklung der Hochfrequenztechnik förmlich. Nicht nur mit einem Übertrager kann man die Hochfrequenz zum Eingang des Verstärkers zurückkoppeln, sehr schnell wurden auch andere Methoden entdeckt. Hartley benutzte dazu beispielsweise einen induktiven Spannungsteiler (eine angezapfte Spule), Colpitts verwendete einen kapazitiven (zwei in Reihe geschaltete Kondensatoren) usw. Wir haben bereits bei der Erzeugung der Sinusschwingung in Schaltung 54 eine Colpitts-Schaltung verwendet. Bild 182 zeigt noch einmal das auf die prinzipielle Funktion „abgestrippte" Schaltbild eines Colpitts-Oszillators.

6.4 Als die Worte fliegen lernten: Sprache formt Hochfrequenz

Das einfache Unterbrechen der Trägerwelle ist langweilig. Wir wollen uns jetzt mit dem Sprechfunk befassen. Dazu formen wir die Amplituden der Hochfrequenz mit der Sprache. Dies ist die älteste Art der Modulation (modulieren heißt formen). Sie wird auch heute noch viel verwendet. Amplitudenmodulation wird AM abgekürzt. Diese Art der Modulation hat damit den Rundfunkempfangsbereichen Langwelle, Mittelwelle und Kurzwelle ihren Namen gegeben.

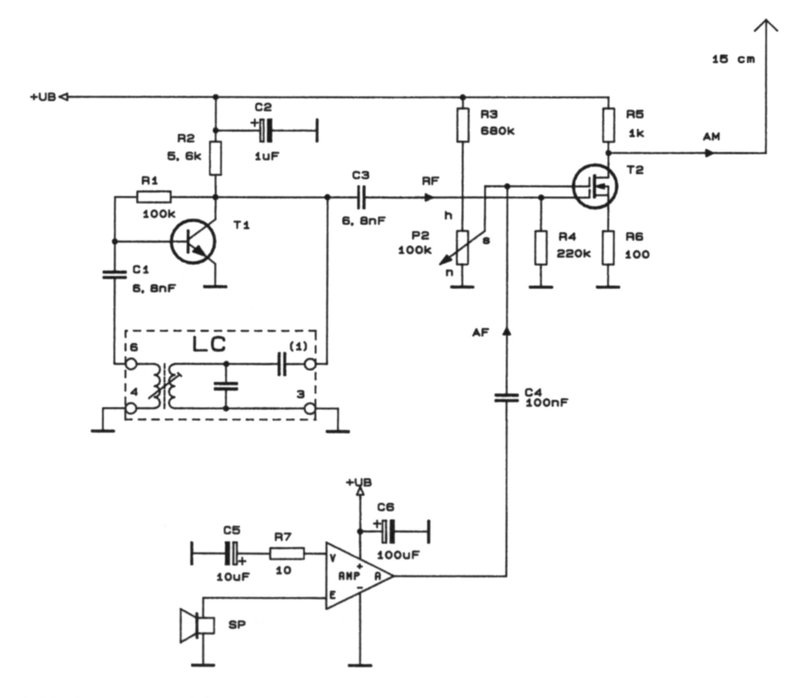
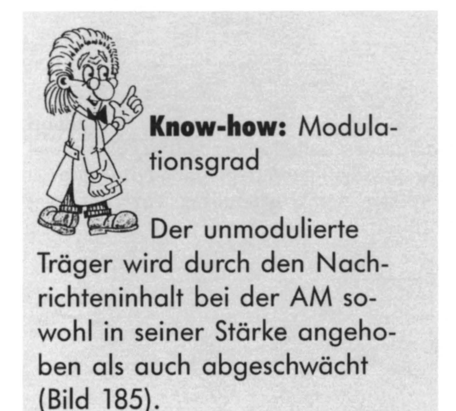


Bild 184. Ein Sprechfunksender mit Amplitudenmodulation. Transistor T 1 bildet mit dem LC-Modul den Oszillator. Das Ausgangssignal des Oszillators wird dem MOS-FET (T2) zugeführt. An Gate2 liegt neben der Gleichspannungs-Voreinstellung (P2) die Ausgangsspannung des Modulationsverstärkers (AMP-Modul). Die Modulation überlagert sich der Gleichspannung an Gate2 und verändert so die Verstärkung von T2.



Know-how: Modulationsgrad

Der unmodulierte Träger wird durch den Nachrichteninhalt bei der AM sowohl in seiner Stärke angehoben als auch abgeschwächt (Bild 185).

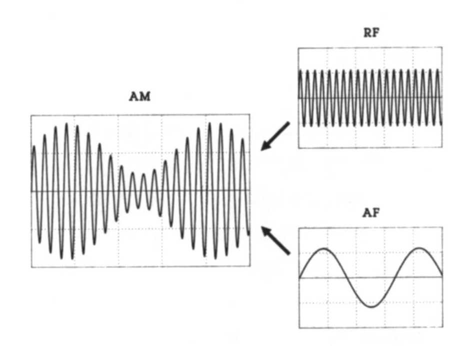


Bild 185. Bei der Amplitudenmodulation wird die Hochfrequenz durch die Niederfrequenz geformt, also bei positiven Niederfrequenzamplituden verstärkt und bei negativen abgeschwächt.

Positive AF-(NF-) Amplituden verstärken die RF(HF), negative schwächen sie ab, äußerstenfalls werden sie vollkommen ausgelöscht (Totalauslöschung). In diesem Fall ist die RF(HF) bei der positiven Sprachamplitude doppelt so groß wie die

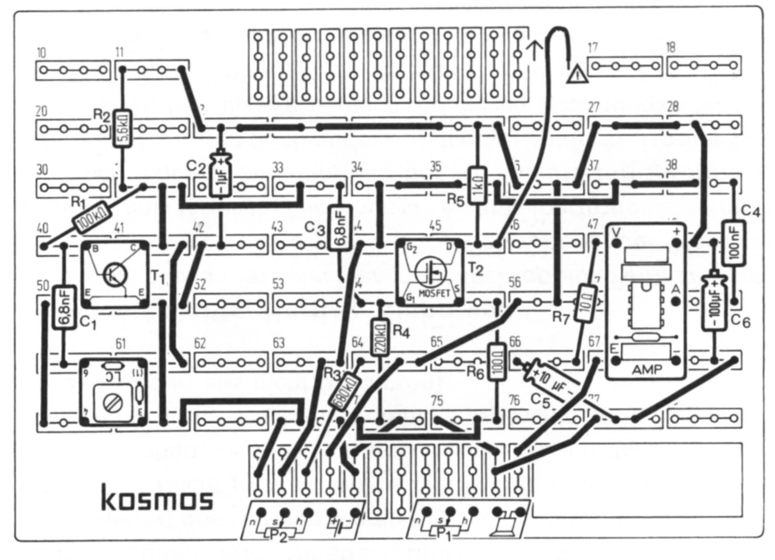


Bild 186. Aufbau zu Schaltung 184.

Experimente

Sprechfunk mit Amplitudenmodulation

Wir bauen einen Sprechfunksender (Bild 186). Um ein Signal mittels eines zweiten zu formen (zu modulieren), ist der MOSFET ideal geeignet: Er hat zwei Eingangstore. Das Hochfrequenzsignal des Meißner-Oszillators wird G1 zugeführt (Schaltung 184). Mit Hilfe von P2 wird die G2-Spannung eingestellt. Dieser Gleichspannungs-Grundeinstellung wird unsere AF-(NF-) Wechselspannung überlagert. Damit die RF(HF) richtig durchmoduliert werden kann, also sowohl größer als auch kleiner gemacht werden kann, muß die Ausgangsspannung zunächst auf einen mittleren Wert eingestellt werden. Wir stellen P2 auf etwa „3" ein. Wir nähern wieder ein Radio der Sendeantenne, wobei wir die Lautstärke zunächst nur sehr vorsichtig bedienen, und sprechen in den Lautsprecher LS, der hier als Mikrofon dient. Dann kann die Lautstärke des Radios vorsichtig erhöht werden. Mit Hilfe von P2 können wir auf klarste Sprachwiedergabe einstellen. Wenn die Lautstärke des Radios zu sehr aufgedreht wird, kommt es zu dem uns schon bekannten Rückkopplungspfeifen. Diesmal aber drahtlos, mit einer Funkbrücke dazwischen. Dies passiert in der Praxis auch immer wieder, wenn der Rundfunk Telefoninterviews durchführt und die Interviewpartner am Telefon die Lautstärke ihres Radios zuhause zu hoch einstellen.

6.5 Radio – ganz einfach

Zum Nachweis unserer selbsterzeugten elektromagnetischen Wellen haben wir uns schon der verschiedenartigsten Empfängerschaltungen bedient. Dabei haben wir festgestellt, daß man es so oder auch anders machen kann. Welche Teile sind unbedingt für einen Radioempfänger notwendig?

Gehimmelt und geerdet!

Als erstes ist sicherlich eine Antenne zu nennen, um das elektromagnetische Feld aus dem Raum in unsere Schaltung zu leiten. Erinnern wir uns: Antennen sind geöffnete Schwingkreise. Wer hat noch nicht die großen Sendemasten gesehen, die sich hoch in den Himmel recken? Die Abmessungen dieser Antennen stehen immer im Verhältnis zur abgestrahlten Wellenlänge. Man kann sich leicht vorstellen, daß für die in den AM-Bereichen benutzten Wellenlängen die Antennen sehr teuer sind. Aus Sparsamkeit benutzt man deshalb einen raffinierten Trick: Man macht die Antenne nur halb so lang wie unbedingt notwendig und verwendet anstelle der anderen Hälfte ihr Spiegelbild. Dazu braucht man nicht einmal einen Spiegel, wie wir ihn aus dem Badezimmer kennen. Da Rundfunkwellen wesentlich langwelliger als Lichtstrahlen sind, spiegeln sie sich an jeder leitenden Fläche. Und dann gibt es noch einen zweiten Trick: Man benutzt als Spiegel die Erde. Der Erdboden ist zwar ein sehr schlechter Leiter, aber ein sehr großer schlechter Leiter! Die Sendemasten spiegeln sich elektrisch am Erdboden. Der Sender wird also mit einem Pol am Mast und mit dem anderen Pol an einem weitverzweigten Erdnetz angeschlossen. Es ist also zweckmäßig, auch unseren Radioempfänger mit einem Pol an eine Antenne (einige Meter Draht) und mit dem anderen Pol an der Erde anzuschließen. Natürlich ist es möglich, einen Metallstab in den Boden einzuschlagen und das Erdreich ringsherum gut zu gießen. Aber es ist einfacher, Gegenstände in

ursprüngliche Trägeramplitude. Das ist die maximal mögliche Modulation (100%). Man muß dafür Sorge tragen, daß die größten auftretenden Lautstärken nicht über diesen Wert hinaus ansteigen, sonst wird die Modulation verzerrt. Das Verhältnis von RF-(HF-) zu AF-(NF-) Amplituden nennt man den Modulationsgrad.

der Wohnung, die bereits Verbindung mit dem Erdreich haben, z.B. Wasserleitungen oder Heizkörper, zu verwenden. Es kann in der Praxis allerdings schon einige Schwierigkeiten bereiten, eine gut leitende Verbindung dazu herzustellen.

Die Guten ins Kröpfchen, die Schlechten ins Töpfchen

Zum zweiten ist eine Schaltung notwendig, die aus der Vielzahl der „im Äther herumschwirrenden" Wellen die gewünschten heraussiebt. Wie wir wissen, benutzt man dazu gewöhnlich Schwingkreise. Allgemein gesprochen handelt es sich hier um ein Frequenzfilter. Im Blockschaltbild wird dies symbolisch durch drei Schwingungszüge dargestellt (B in Bild 187), von denen jeweils einige durchgestrichen sind. In unserem (dem meist vorkommenden) Fall handelt es sich um ein Bandpaßfilter. D.h. aus dem Frequenzgemisch wird irgendeine Frequenz herausgepickt. Höhere und tiefere Frequenzen sollen unterdrückt werden. Infolgedessen ist der obere und der untere Schwingungszug im Symbol durchgestrichen, der mittlere dagegen darf sich in voller Pracht zeigen. Nach dem gleichen Schema werden auch Hoch- und Tiefpässe sowie Bandsperren gezeichnet.

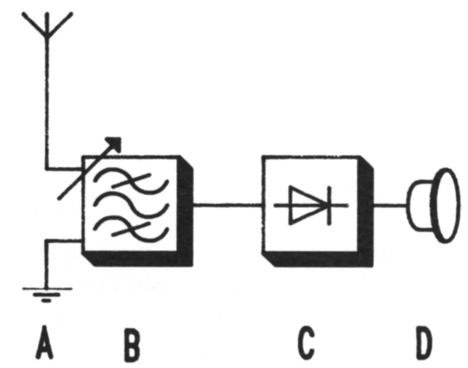


Bild 187. Der einfachste Empfänger besteht aus Antenne (A), Selektion (B, meist ein Schwingkreis) und einem Demodulator (C, im einfachsten Fall eine Diode) und schließlich aus einem elektroakustischen Wandler, wie Ohrhörer oder Lautsprecher (D).

Der Detektor entdeckt die Modulation

Nachdem die gewünschte Frequenz ausgesucht (als Fachwort: selektiert) ist, muß der Nachrichteninhalt, die Niederfrequenz, wiedergewonnen werden. Der Fachausdruck dazu lautet: der Träger wird demoduliert. Wie wir wissen, funktioniert dies ganz einfach durch Gleichrichtung (Stufe C im Blockschaltbild).
Jetzt muß nur noch der AF-(NF-)Wechselstrom wieder in Schall umgewandelt werden. Dazu würde ein Kopfhörer mit mindestens 2000 Ω Innenwiderstand genügen. Im Prinzip kann man also völlig verstärkerlose Radios ohne eigene Stromversorgung bauen. Leider ist unser Ohrhörer zu „niederohmig", um dies demonstrieren zu können. In der Serie LIBRARY OF SCIENCE ist bei KOSMOS jedoch ein Set „Detektor-Radio" mit einem sehr hochohmigen Kristall-Ohrhörer erschienen, das ohne jede externe Stromversorgung arbeitet. Funkbegeisterte in aller Welt lauschten mit solch einfachen Detektorempfängern den ersten Rundfunksendungen. 1920 übertrug der Versuchssender in Königs Wusterhausen zum erstenmal ein Instrumentalkonzert. Im Jahre 1923 hieß es zum erstenmal: „Achtung! Achtung! Hier ist Berlin!" Das erste Massenmedium war geboren! In den folgenden Jahren entwickelte sich ein „Radiofieber" ohnegleichen. Nie zuvor war es möglich gewesen, gleichzeitig so viele Menschen zu erreichen.

Experimente

Detektorempfänger

Wir verwenden die Spule der Ferritantenne und ein Plattenpaket des Drehkondensators des MF-Moduls als Schwingkreis für das Eingangsfilter. In schon gewohnter Weise arbeitet die Germaniumdiode Ge als Demodulator. Ein Kondensator hinter dem Demodulator schließt die restliche Hochfrequenz kurz und läßt nur die AF(NF) ungeschoren passieren. Mit einem hochohmigen Kopfhörer würde die gesamte Schaltung wie in Bild 188 gezeigt aussehen. Leider brauchen wir das AMP-Modul mit der dazugehörigen Batterie, um die Programme hörbar zu machen (Schaltbild 189, Aufbau 191). Dafür können wir uns aber den Luxus des Lautsprecherempfangs leisten. Zuerst drehen wir mit einem kleinen Schraubendreher die Trimmkondensatoren auf der uns zu-

Know-how: Funkpeilung

Durch die Bündelung des magnetischen Feldes haben die Feldlinien einen bevorzugten Eingang zur Spule. Feldlinien, die senkrecht auf die Stirnseiten des Ferritkerns treffen, induzieren besonders hohe Empfangsspannungen. Der Sender ist am lautesten, wenn die Breitseite der Ferritantenne in die Richtung zum Sender zeigt. Um einen Sender anzupeilen, benutzt man aber besser die Längsrichtung des Stabes: Man dreht die Antenne so, daß die Lautstärke ein Minimum wird. Meist verschwindet sogar der Sender in einem ganz scharf umgrenzten Winkelbereich. Diese Art der Peilung ist deutlich schärfer als die Suche des Maximums. Aber ob der Sender vor oder hinter der Antenne liegt, kann in keinem Fall mit nur einer Ferritantenne entschieden werden. Hierzu benötigt man die Mithilfe einer weiteren Empfangsstation, die von einem anderen Ort aus peilt. Beide bestimmen die

gewandten Seite des Drehkos auf kleinste Kapazität. Die Trimmer sind dann richtig eingestellt, wenn die drehbaren Platten mit den Isolierscheiben einen Vollkreis bilden. Die Masse des Empfängers wird mit Erde, also z.B. der Wasserleitung, oder mit einem Heizkörper verbunden, die (Draht-)Antenne wird zunächst am Anschluß 1 der Ferritantenne eingesteckt. Obwohl es sich um eine recht primitive Schaltung handelt, sind zumindest die starken Sender zu hören.

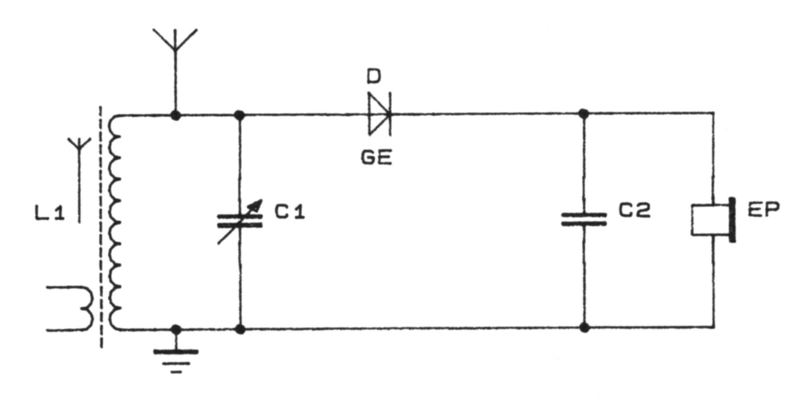


Bild 188. Besitzer eines hochohmigen Kopfhörers können die klassische Schaltung eines Detektorempfängers nachempfinden. Er funktioniert völlig ohne Fremdenergie. Er begnügt sich mit dem, was die Antenne an „Saft" liefert.

Detektorempfänger mit Niederfrequenzverstärker

Nicht nur, daß unser Radio sehr leise spielt, nein, vor allem wollen wir mehr Sender hören. Dazu ist es notwendig, auch die ganz schwachen bis jetzt unhörbaren Signale zu verstärken. Die meiste Erfahrung haben wir mit Niederfrequenzverstärkern. Deshalb benutzen wir wieder unsere Standardschaltung, um die demodulierte AF(NF) zu verstärken (Bild 193). Die Verbesserung ist gewaltig, aber es läßt uns nicht ruhen: Das Bessere ist bekanntlich der Feind des Guten.

Detektorempfänger mit RF-(HF-)Verstärker

Das Hauptproblem unseres kleinen Radios ist die hohe Schwellenspannung der Diode. Die von der Antenne aufgenommenen und vom Schwingkreis selektierten Spannungen müssen mindestens die Hürde der Schwellenspannung der Germaniumdiode überwinden, um überhaupt zum AF-(NF-)Verstärker durchgelassen zu werden. Was liegt näher, als einen Verstärker *vor* der Diode einzubauen? Wir benutzen dazu den MOSFET (Bild 196). Diese Schaltung stellt schon ein ganz brauchbares Radio dar. Es gelingt sogar, den Empfänger ohne Hochantenne und Erdan-

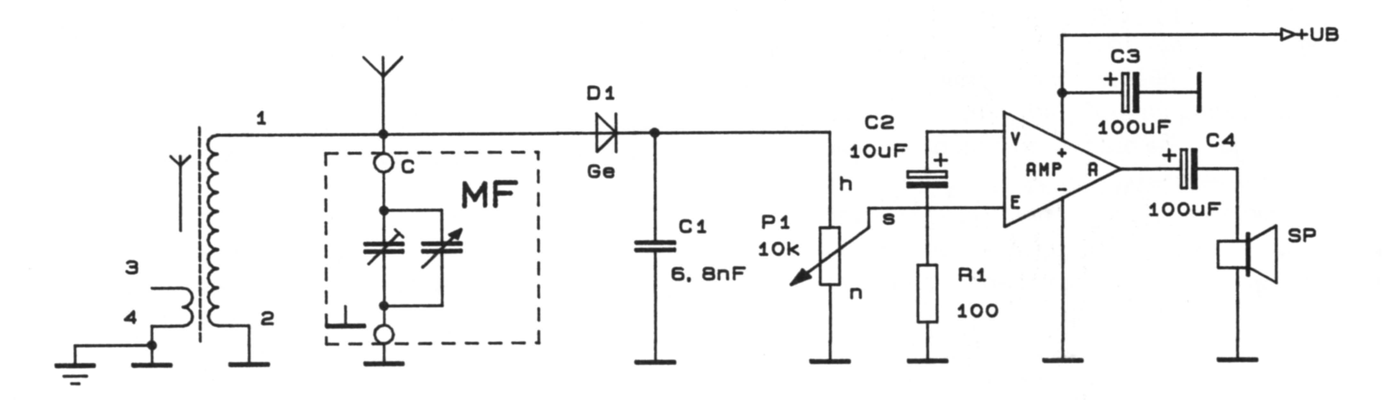


Bild 189. Ein Detektorempfänger mit nachgeschaltetem AMP-Modul.

Richtung und tragen sie als Funkstrahl in eine Landkarte ein. Der Schnittpunkt der beiden Linien ist der gesuchte Standort des Senders (Bild 190).

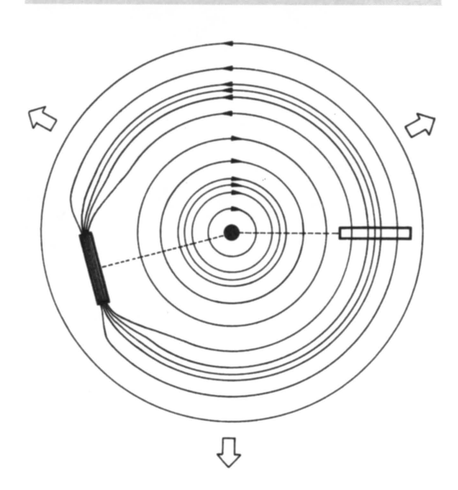


Bild 190. Der Sender ist am lautesten zu hören, wenn die Längsseite der Ferritantenne zum Sender zeigt.

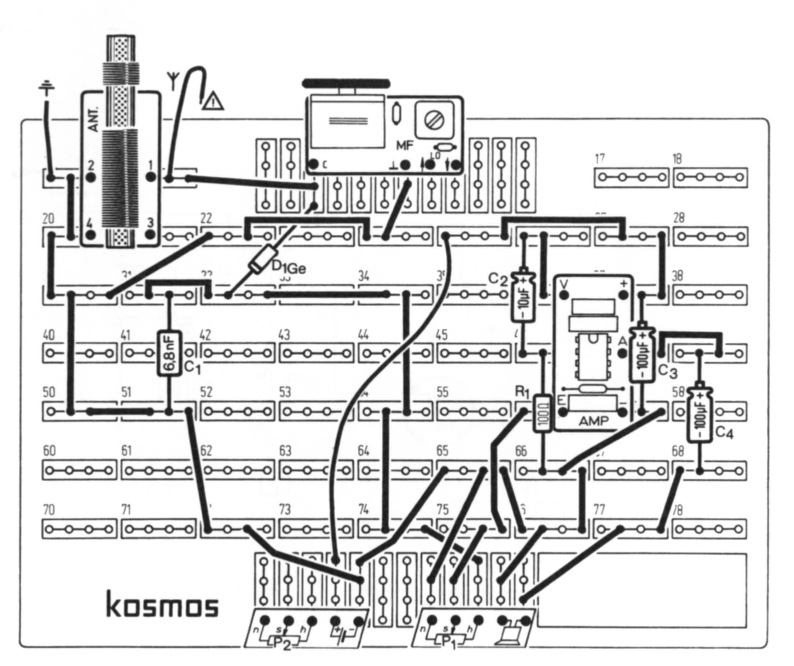


Bild 191. Aufbau zu Schaltung 189.

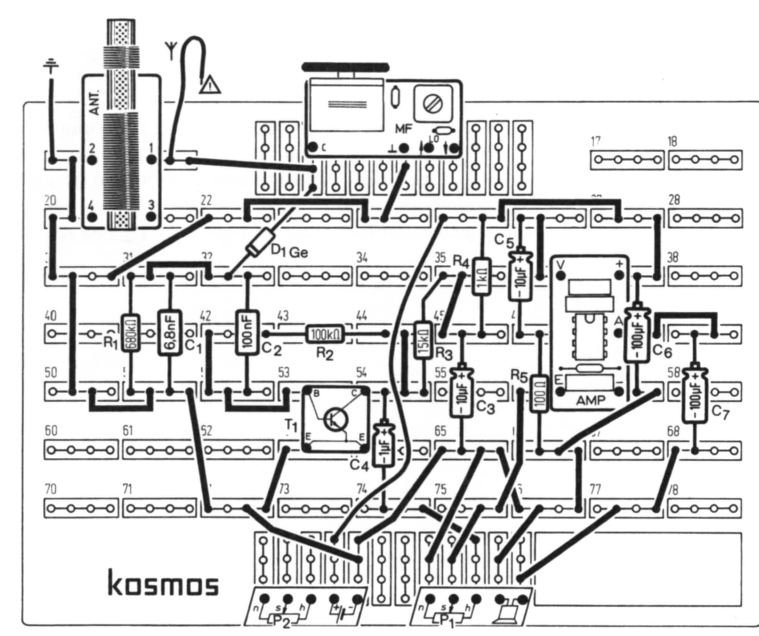


Bild 193. Aufbau zu Schaltung 192.

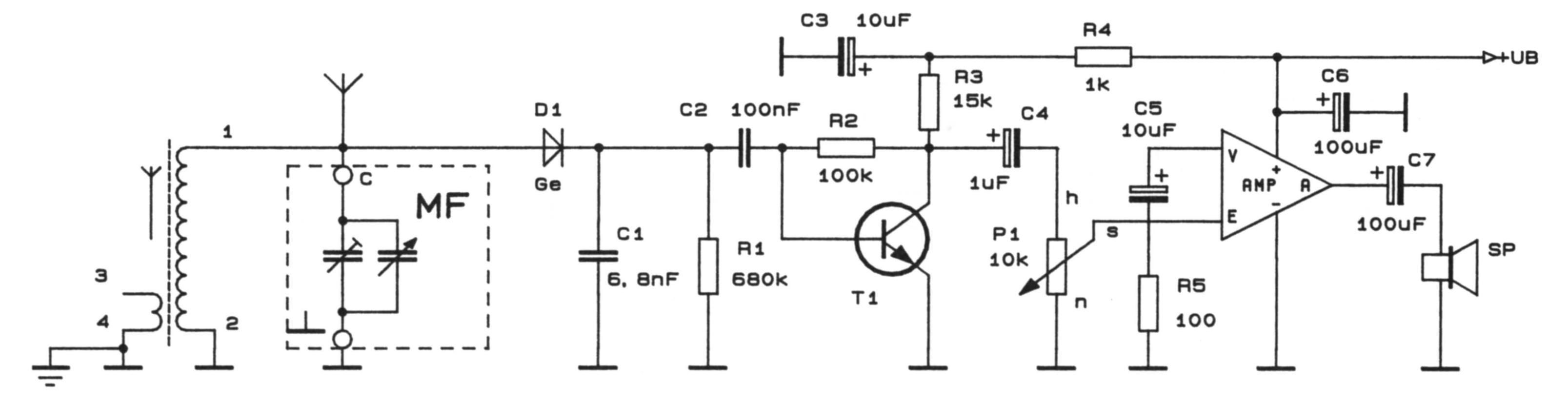
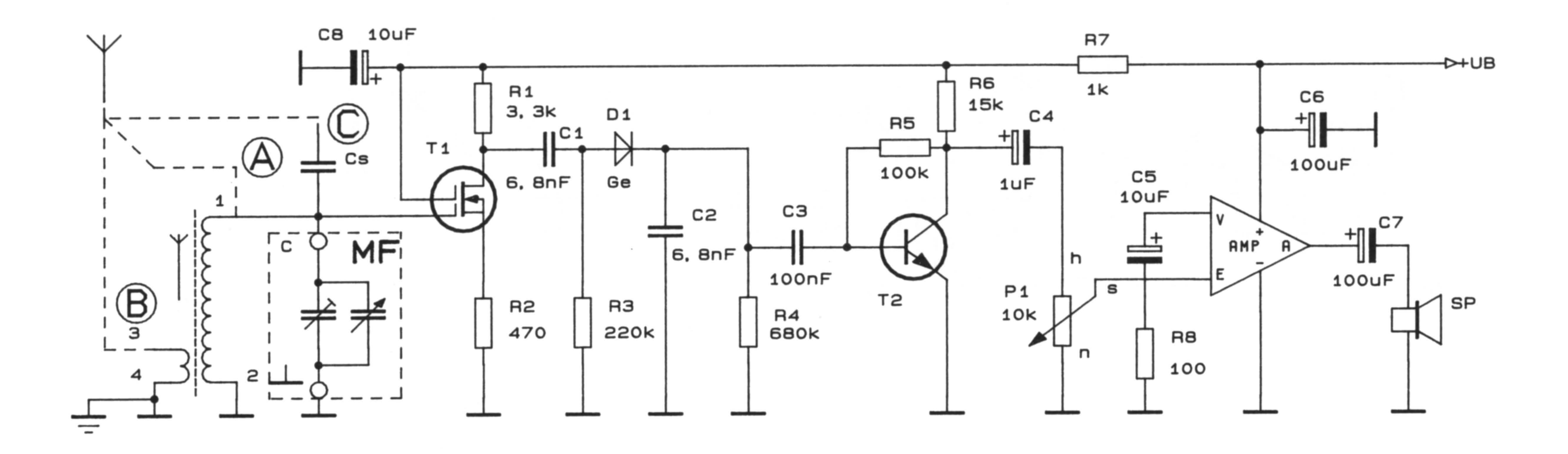


Bild 192. Ein zusätzlicher Niederfrequenzverstärker mit dem Transistor T 1 bringt erheblichen Lautstärkegewinn.



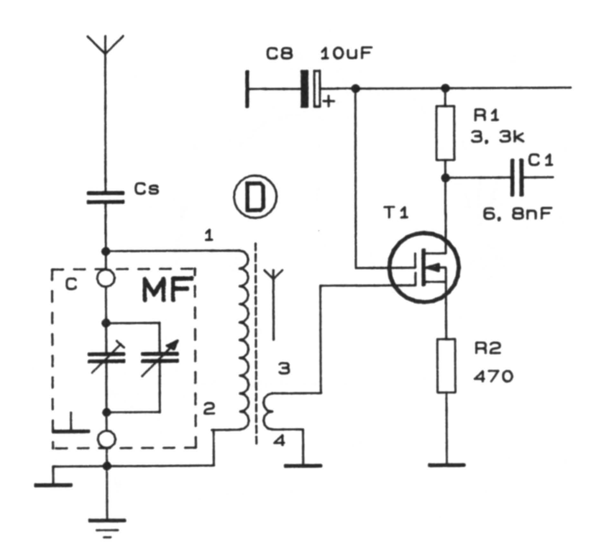


Bild 194. Der MOSFET T 1 arbeitet als Hochfrequenzverstärker vor dem Demodulator (D1). Wenn die Antenne direkt am Hochpunkt des Schwingkreises angeschlossen ist (Ⓐ), wird er stark gedämpft und hat nur eine geringe Trennschärfe. Wenn die Antenne dagegen loser an den Schwingkreis gekoppelt ist (Ⓑ und Ⓒ), ergibt sich eine deutlich bessere Trennschärfe. Ⓑ ist eine induktive, Ⓒ eine kapazitive Kopplung.

Know-how: Geradeausempfänger

Bisher waren alle von uns benutzten Empfängerschaltungen sogenannte Geradeausempfänger. Hierbei wird das Empfangssignal lediglich verstärkt und demoduliert. Diese Empfänger werden je nach der Lage und der Anzahl der Verstärkerstufen klassifiziert. Ein Empfänger mit einer Hochfrequenz-Verstärkerstufe vor dem Demodulator und einer Niederfrequenz-Verstärkerstufe dahinter bezeichnet man als 1-V-1 (Bild 195).

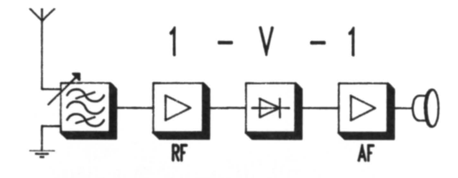


Bild 195. Man bezeichnet Geradeausempfänger nach der Reihenfolge der Verstärkerstufen in bezug auf den Demodulator. Das V steht für die Demodulatorstufe. Ein Geradeausempfänger mit einer Hochfrequenz- und einer Niederfrequenz-Verstärkerstufe ist demnach ein 1-V-1.

schluß, nur mit der Ferritantenne zu betreiben. Besonders gute Ergebnisse erhalten wir jedoch, wenn wir zusätzlich zur Ferritantenne, die ja hauptsächlich magnetische Feldanteile aufnimmt, eine kurze Stabantenne (einen Draht von ca. 1m Länge) wie bei einem Kofferradio anschließen. Der Draht empfängt zusätzlich die elektrische Feldkomponente (Ⓐ in Bild 196).

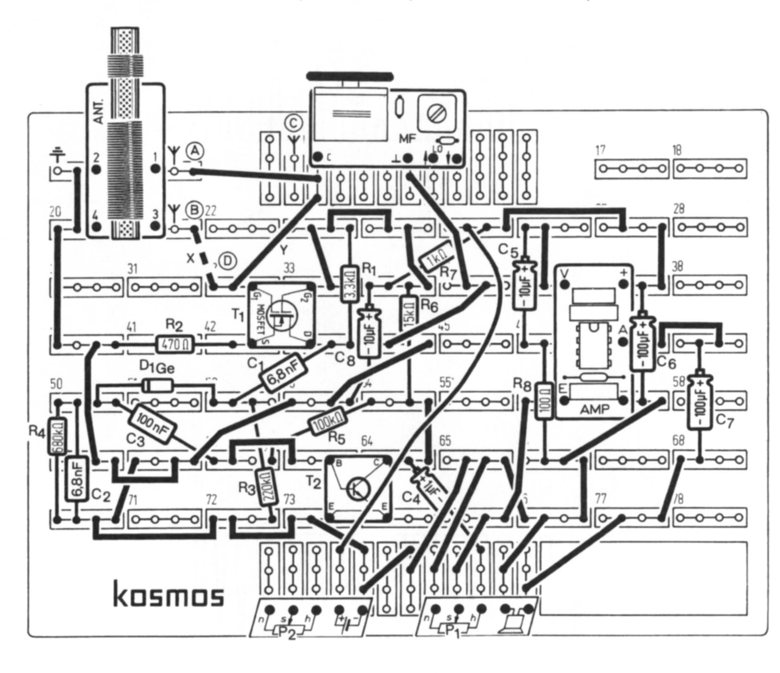


Bild 196. Aufbau zu Schaltung 194.

Antenne mit Richtwirkung

Ganz ohne zusätzliche Antenne können wir uns am besten von der Richtwirkung der Ferritantenne überzeugen: Wir drehen die gesamte Steckplatte langsam hin und her. In bestimmten Lagen wird der empfangene Sender lauter, in anderen dagegen leiser. Vielleicht entdecken wir jetzt sogar noch schwache, bisher noch nicht gehörte Sender, indem wir starke durch die Drehung der Antenne ausblenden.

Lautstärke kontra Trennschärfe

Die Antenne wird jetzt am Anschluß 3 der Ferritantenne, also am heißen Ende der kleinen Wicklung, angeschlossen (Ⓑ in Bild 196). Der Fachmann sagt dazu, die Antenne ist lose an den Schwingkreis angekoppelt. Um wieder einen Sender zu empfangen, muß der Drehko geringfügig anders abgestimmt werden. Die Kapazität der Antenne war nämlich parallel zu unserem Drehko geschaltet und hat somit den Kreis verstimmt. Die Sender sind deutlich leiser zu hören als im vorigen Versuch. Aber sofern mehrere zu hören waren, sind sie jetzt besser voneinander zu trennen. Unser Schwingkreis ist trennschärfer geworden. Der Fachmann spricht von verbesserter Selektion.

Kapazitive Kopplung

Die Antenne kann auch über einen Kondensator mit wenigen pF angekoppelt werden. Wir nutzen dazu die Kapazität zweier benachbarter Steckfedern aus. Der Antennendraht wird in die Steckfeder neben dem Anschluß C des MF-Moduls gesteckt (Ⓒ in Bild 196). Die Kopplung ist ebenfalls sehr lose.

Leise, aber ungestört

Besonders hohe Trennschärfe – leider verbunden mit einem weiteren Lautstärkerückgang – erhalten wir, wenn wir den MOSFET T 1 nicht an den Hochpunkt des Schwingkreises sondern an die kleine Koppelwicklung anschließen (Ⓓ in Bild 196: Die gestrichelte Drahtbrücke X wird eingesteckt und die Drahtbrücke Y herausgezogen). Der Schwingkreis wird so am wenigsten gedämpft und kann dadurch besonders scharf auf die Sender eingestellt werden.

Zweimal Niederfrequenz

Wir ziehen die Germaniumdiode Ge heraus und stecken sie umgekehrt wieder ein. Wir bemerken keinen Unterschied, das Radio spielt so oder so. Im ersten Fall wurden von dem modulierten Träger nur die positiven Amplituden ausgenutzt (Bild 197). Infol-

Unsere vorhergehende Schaltung mit nur einem Niederfrequenz-Verstärker hinter dem Demodulator wäre sinngemäß ein 0-V-1, wenn das AMP-Modul nicht wäre.



Know-how: Entkopplung für den ungestörten Hörgenuß

Der hohe Strombedarf des AMP-Moduls läßt die Batteriespannung im Takt der AF(NF) schwanken. Diese Schwankungen übertragen sich auch auf die Vorstufen und werden dort erneut verstärkt. Es handelt sich also um eine, diesmal unerwünschte, klassische Rückkopplungsschaltung. Der Siebkondensator C8, brüderlich vereint mit dem Entkopplungswiderstand R6, glättet die Versorgungsspannung, so daß keine AF(NF) über die Plus-Leitung auf die Vorstufen kommen kann. Die klangverbessernde Wirkung ist enorm.

gedessen war die Spannung hinter der Diode (gegen Masse gemessen) positiv. Jetzt werden nur die negativen Amplituden der Hochfrequenz ausgenutzt. Zwar ist dann die Spannung nach der Diode negativ gerichtet, aber – und nur darauf kommt es an – die Schwankung (der Wechselspannungsanteil) ist gleich. Die AM transportiert offenbar völlig überflüssigerweise zweimal dieselbe Information.

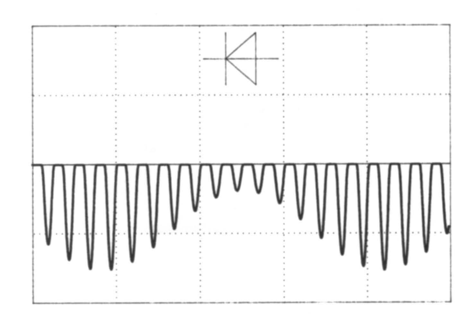


Bild 197. Es ist völlig gleichgültig, ob wir für die Gewinnung der Niederfrequenz die positiven oder negativen Halbwellen des modulierten Trägers ausnutzen.

Reflexempfänger

Zu einer Zeit, als Radios noch mit Röhren gebaut wurden und diese sehr teuer waren, erfanden pfiffige Entwickler den Reflexempfänger (Bild 198). Der raffinierte Trick dabei ist, daß man einen Transistor doppelt ausnutzt. Die von T 1 verstärkte RF(HF) des Schwingkreises gelangt an die Basis von T2 (a), wird dort verstärkt (b), von der Diode gleichgerichtet (c) und erneut der Basis von T2 als Niederfrequenz zugeführt. Die AF(NF) wird erneut verstärkt (d) und dem eigentlichen Niederfrequenzverstärker AMP zugeführt. Das Signal durchläuft also zweimal den Transistor T2. Besonders erwähnenswert ist in dieser Schaltung die Verwendung der Germaniumdiode Ge, die hier nicht die gewünschte Halbwelle durchläßt, wie bisher üblich, sondern stattdessen die unerwünschte kurzschließt. Das Resultat ist das gleiche.

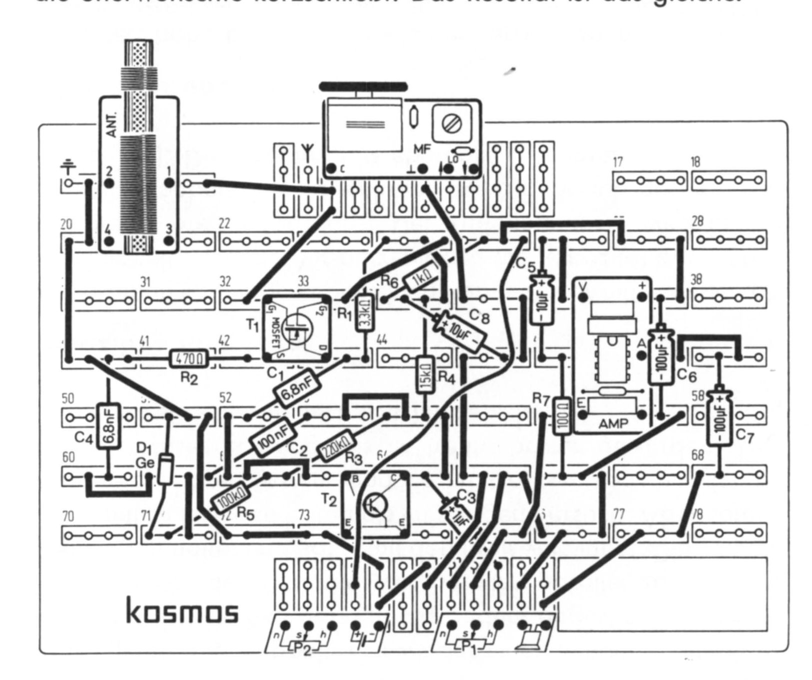


Bild 198. Aufbau zu Schaltung 199.

Audion

Eine weitere Sparmaßnahme war in früheren Zeiten die Verwendung eines Transistors für Demodulation und Verstärkung gleichzeitig. Jahrzehntelang hat diese Schaltung unter dem Namen

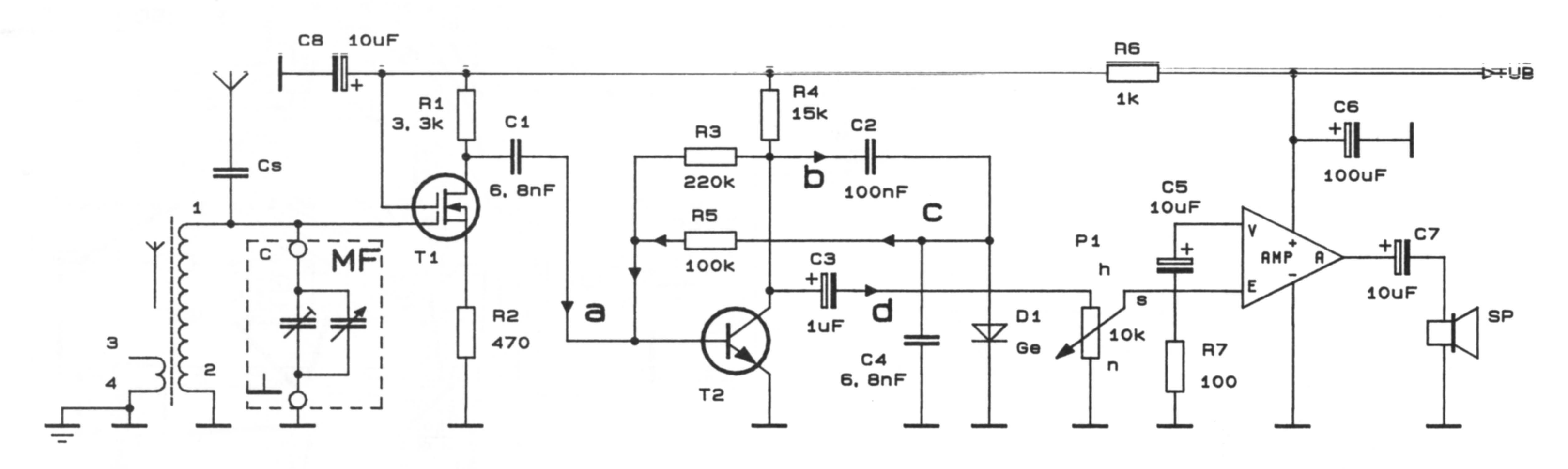


Bild 199. Ein Reflexempfänger nutzt einen Transistor doppelt aus. T2 verstärkt sowohl die Hochfrequenz wie auch die Niederfrequenz.

Audion (lateinisch, audio: ich höre) die Rundfunktechnik bestimmt. Der grundsätzliche Trick besteht darin, daß die Basisvorspannung des Transistors so niedrig eingestellt wird, daß ihn nur die positiven Halbwellen durchsteuern können. Bei den negativen Halbwellen wird er dagegen noch weiter gesperrt (Bild 202). Damit wirkt der Verstärker auch wie ein Gleichrichter. Ein weiterer Name für diese Schaltung ist deshalb Basisgleichrichter. Wir stellen in Aufbau 201 zunächst an Poti P1 nur eine mäßige Lautstärke ein – etwa „1...2". Dann drehen wir Poti P2 vorsichtig auf – etwa bis Stellung „3". Nun suchen wir wie gewohnt mit dem Drehko einen Sender. Meist muß der Arbeitspunkt mit Poti P2 nachkorrigiert werden. Bei stark einfallenden Sendern überschlägt sich der Lautsprecher geradezu, es kommt zu Knurren und Pfeifen. In diesem Fall muß P2 etwas zurückgedreht werden – etwa in Stellung „2". Bei sehr schwach einfallenden Sendern dagegen kann P2 bis auf etwa „3" aufgedreht werden. Darüber wird aber T2 schon nur aufgrund der Basisvorspannung leitend, und es findet keine Gleichrichtung mehr statt. Es gehört schon eine ganze Menge Fingerspitzengefühl dazu, eine Audionschaltung richtig zu bedienen. Dafür weist sie aber eine gute Empfindlichkeit auf, und es können auch sehr schwache, entfernte Sender empfangen werden.

Motorboot im Radio

Sicher ist Euch schon der ungewöhnlich hohe Aufwand bei der Zuführung der Betriebsspannung aufgefallen. Die Batterie wird direkt an der Leistungsendstufe (dem AMP-Modul) angeschlossen. Die AF(NF) bekommt eine bequeme Abkürzung über den 100-μF-Kondensator angeboten. Die beiden weiter vorne liegenden Stufen werden über weitere RC-Glieder (R6, C8) versorgt. Wir drehen die Lautstärke ziemlich weit auf – sofern die Nachbarn es erlauben – und entfernen den Kondensator C6. Sofort jault, pfeift und knurrt es aus dem Lautsprecher. Oft erinnert das Geräusch an das Knattern eines Motorbootes. Techniker sprechen im Laborjargon deshalb von „motorboating".

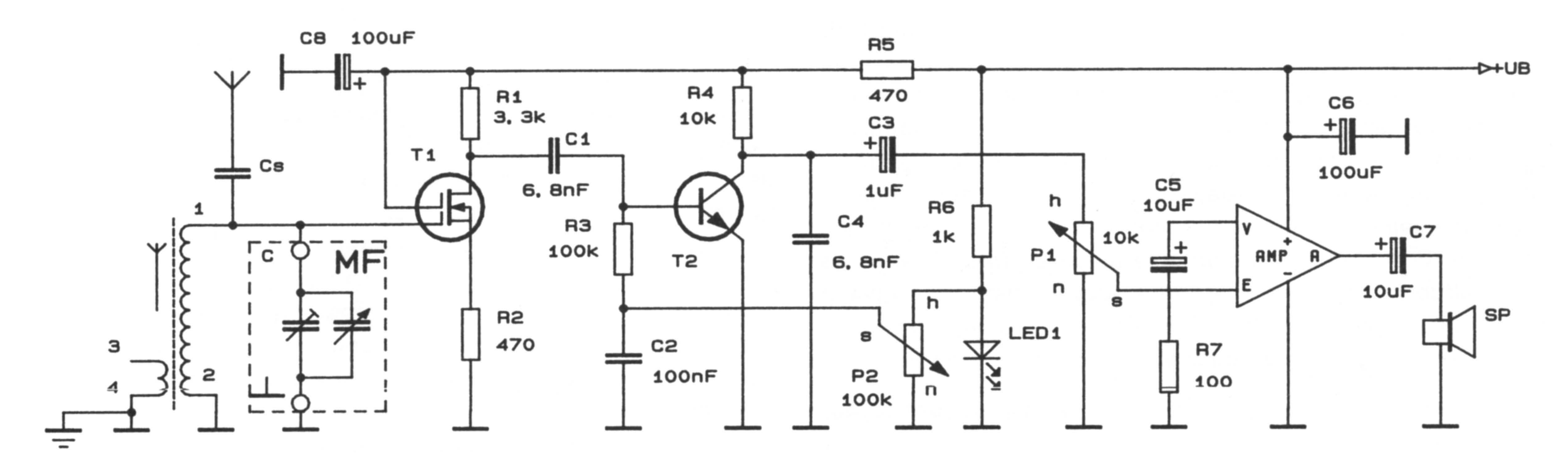


Bild 200. Wenn der Arbeitspunkt eines Verstärkers (T2) so niedrig eingestellt wird, daß er nur eine Halbwelle verstärkt, so wirkt er wie ein (verstärkender) Gleichrichter. Man bezeichnet diese Schaltung als Basisgleichrichter oder kurz als Audion.

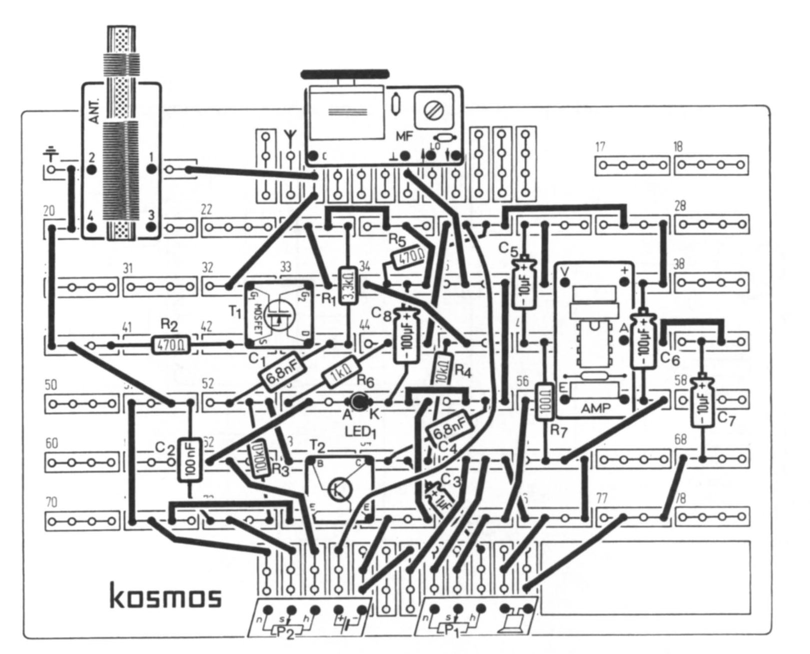


Bild 201. Aufbau zu Schaltung 200.

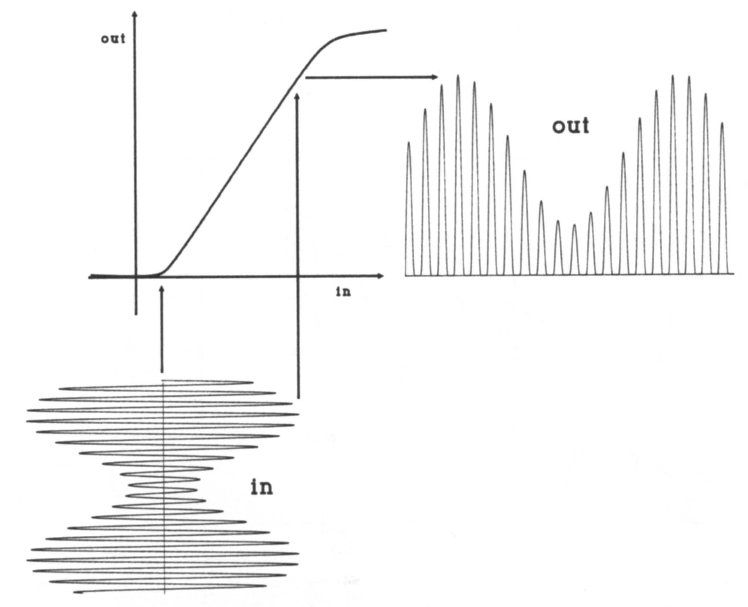


Bild 202. Das Prinzip des Basisgleichrichters: Nur positive Halbwellen steuern den Verstärker aus.



Know-how: Fototransistor – Lichtquanten steuern Strom

Ein Fototransistor wird nicht durch einen Basisstrom, sondern durch Licht gesteuert. Er wird leitend, wenn Licht auf seine Halbleiterfläche fällt. Deshalb wurde bei unserem Fototransistor der Basisanschluß gleich weggelassen und stattdessen sein Gehäuse aus durchsichtigem Kunststoff hergestellt. Für die Erklärung dieses Vorgangs benutzen die Physiker das sogenannte Korpuskelmodell des Lichtes. Sie stellen sich das Licht als einen Strom von vielen kleinen Teilchen vor. Die Teilchen werden Lichtquanten oder Photonen genannt. Kein geringerer als Albert Einstein persönlich war der Schöpfer dieses Modells. Die Lichtquanten schlagen Elektronen aus dem Halbleitermaterial. Die so befreiten Elektronen lassen einen winzigen Basisstrom fließen, der wie beim "normalen" Transistor einen Kollektor-Emitter-Strom zur Folge hat. Wie es halt mit Modellen so ist,

Gleichrichtung am MOSFET

Selbstverständlich kann auch der MOSFET die Arbeit der Gleichrichtung übernehmen (Bild 204). Dazu arbeitet er nicht mehr wie bisher als reiner Hochfrequenzverstärker, sondern sein Arbeitspunkt wird jetzt so eingestellt, daß er nur die positiven Halbwellen der Hochfrequenz durchläßt und entsprechend verstärkt. Da dazu die G1-Spannung geringfügig negativer als die Source-Spannung sein muß, „klemmen" wir die Source-Spannung auf einen festen Wert mit LED1. An Source liegt damit immer die Schwellenspannung der Leuchtdiode. Die Drahtbrücke X bleibt zunächst eingesteckt. Mit P2 wird der Arbeitspunkt eingestellt. Tip: Zunächst auf etwa „3...4" einstellen. Das RC-Glied R4/C3 läßt nur die AF(NF) passieren und führt sie der Basis von T2 zu. T2 arbeitet als reiner AF-(NF-)Verstärker. Diese Schaltung wird aufgrund der fehlenden RF-(HF-)Verstärkung wesentlich besser mit starken Sendern fertig.

Ein helligkeitsgesteuertes Weckradio

Hier ein besonderes Schmankerl für Ökofreaks: Das Radio soll beim ersten Morgenlicht zu spielen beginnen. Bei aller Naturverbundenheit ist aber zu bedenken, daß dieser Wecker nicht im Winter nördlich des Polarkreises benutzt werden sollte. Wir entfernen die Drahtbrücke X und fügen stattdessen den Fototransistor TF ein. Es ist besonders wichtig, auf die richtige Anschlußreihenfolge zu achten. Das kurze Bein ist der Kollektor und muß infolgedessen dem Pluspol der Batterie zugewandt sein. Zu Testzwecken kann eine Taschenlampe die Morgensonne ersetzen. Logischerweise muß für diesen Versuch das Zimmer abgedunkelt sein.

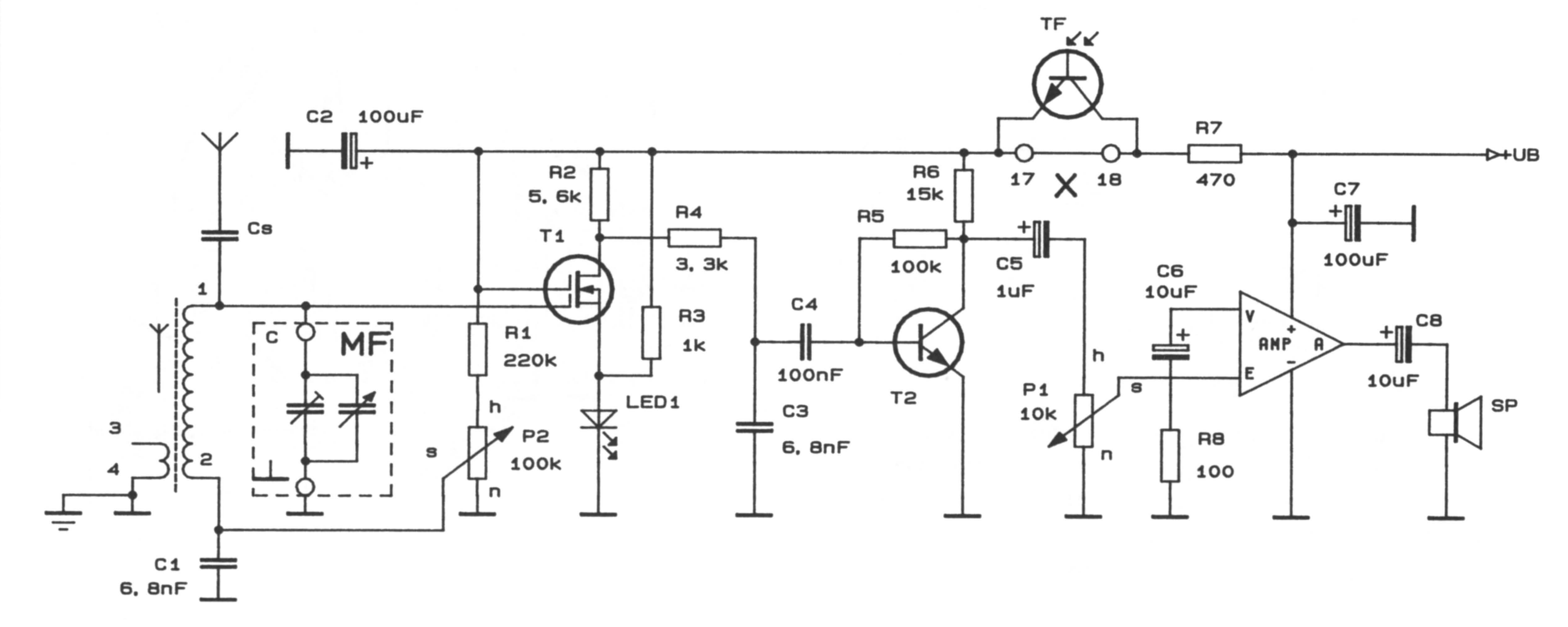


Bild 203. Auch ein MOSFET kann als Audion arbeiten. Ein helligkeitsgesteuertes Weckradio entsteht, wenn wir die Drahtbrücke X entfernen.

niemand kann die Physiker (und uns!) daran hindern, das Licht in einem anderen Zusammenhang wieder als elektromagnetische Welle zu betrachten, wenn es dann die bessere Erklärung liefert! Dies ist keine Wissenschaftsschelte, Modelle sind eben immer nur der Versuch, sich das Unvorstellbare vorstellbar zu machen!



Know-how: Die Thomsonsche Schwingkreisformel

Induktivität und Kapazität bestimmen die Resonanzfrequenz. Natürlich läßt sich die Resonanzfrequenz auch aus gegebenen Bauteilewerten berechnen:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

Dabei ergibt sich die Frequenz in Hz wenn L in Henry und C in Farad eingesetzt werden. Es lohnt sich nicht, Spezialformeln für μH und pF auswendig zu lernen, da jeder einfache Taschenrechner brillant mit Zehnerpotenzen umgehen kann: 1 pF = 10^{-12} F (1E-12 eintippen), 1 μH = 10^{-6} H (1E-6 eintippen).

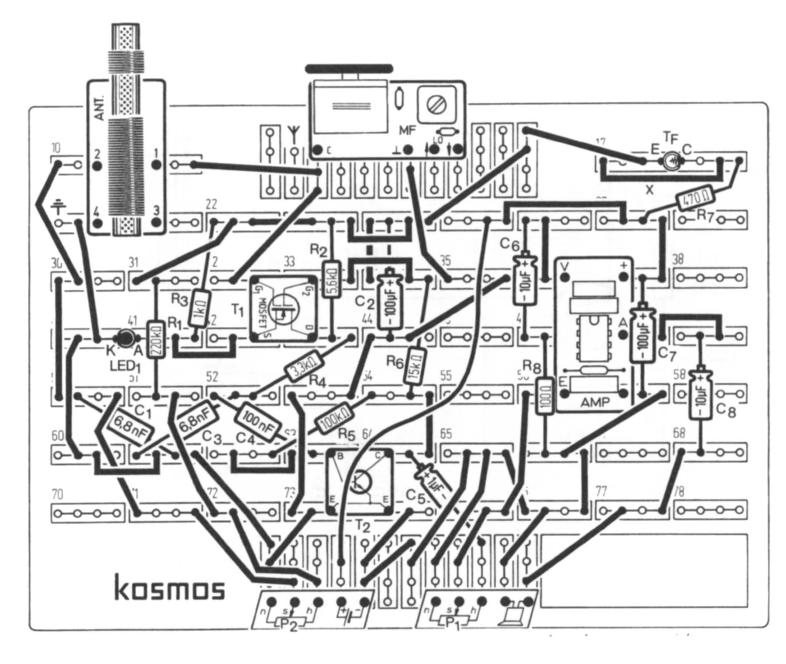


Bild 204. Aufbau zu Schaltung 203.

Abstimmen mit Spule und Kondensator

Wir suchen uns mit dem Aufbau nach Bild 204 einen lautstarken Sender. Die kleine, scheinbar getrennte Wicklung auf unserer Ferritantenne entspricht nicht etwa der kleinen Spule mit den Anschlüssen 3 und 4 im Schaltbild 203, diese kleine Wicklung ist vielmehr ein Teil der großen Spule. Je nachdem, ob sie dicht an die große Wicklung herangeschoben ist oder weiter von ihr entfernt wird, verändert sich die Induktivität dieser kleinen Wicklung und damit die Gesamtinduktivität zwischen den Anschlüssen 1 und 2. Wir schieben die kleine Wicklung an das äußerste Ende des Ferritstabes. Dadurch verstimmt sich die Resonanzfrequenz des Schwingkreises zu höheren Frequenzen hin. Um den gleichen Sender wieder scharf zu empfangen, müssen wir zum Ausgleich den Drehko weiter hinein, d.h zu größeren Kapazitätswerten hin drehen. Wird dagegen die kleine Spule ganz dicht an die große herangeschoben, vergrößert sich die Gesamtinduktivität, und entsprechend muß der Drehko zu niedrigeren Kapazitätswerten hin verstimmt werden, um den Sender wieder klar zu empfangen. Die Resonanzfrequenz eines Schwingkreises wird sowohl von der Induktivität als auch der Kapazität bestimmt (Bild 205)!

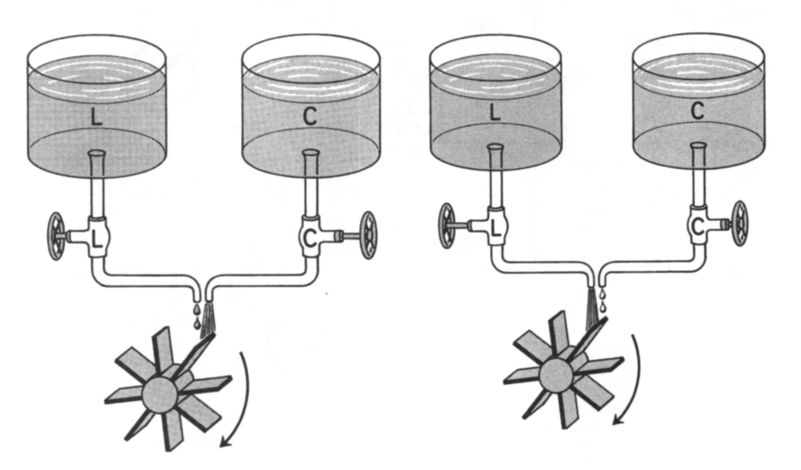


Bild 205. Die Turbine dreht sich gleich schnell, egal ob aus dem Rohr L wenig und aus dem Rohr C viel Wasser fließt oder umgekehrt, oder ob beide Ventile L und C nur halb aufgedreht sind. Auch ein Schwingkreis kann für die gleiche Resonanzfrequenz mit einer kleinen Spule und einem großen Kondensator oder einer großen Spule und einem kleinen Kondensator aufgebaut werden.

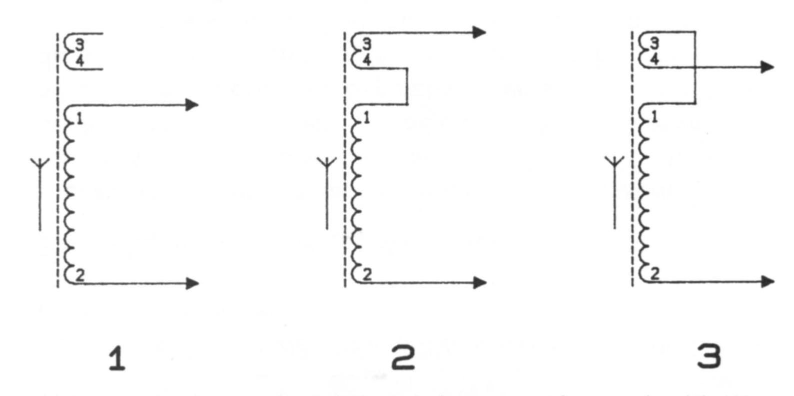


Bild 206. Spulen können durch Reihenschaltung vergrößert werden (2). Wenn sich die Wicklungen auf demselben Eisenkern befinden, können sie sich auch durch entgegengesetzten Wicklungssinn verringern (3).



Know-how: Die Richtung des Magnetfeldes entscheidet

Prinzipiell gilt: Die Gesamtinduktivität der Reihenschaltung zweier Spulen entspricht der Summe der Einzelinduktivitäten. Dies ist aber nur dann richtig, wenn es sich um völlig getrennte Spulen handelt, deren Magnetfelder sich gegenseitig nicht stören. Mit zwei getrennten, weit voneinander entfernten Spulen wäre der Versuch mit der Verkleinerung der Induktivität durch Gegeneinanderschalten nicht möglich gewesen. In unserem Fall fließt der Strom durch einen Teil der gesamten Spule entgegengesetzt zum Hauptstrom. Infolgedessen ist sein Magnetfeld dem Hauptfeld entgegengerichtet, und deshalb wird die Wirkung einiger Drahtwindungen aus der großen Wicklung aufgehoben. Es ist gerade so, als ob diese Windungen gar nicht vorhanden wären! Diese Art der Reihenschaltung wirkt also induktivitätsvermindernd. Im Fachchinesisch wird die Wicklungsmethode als bifilar (= zweidrähtig) bezeichnet.

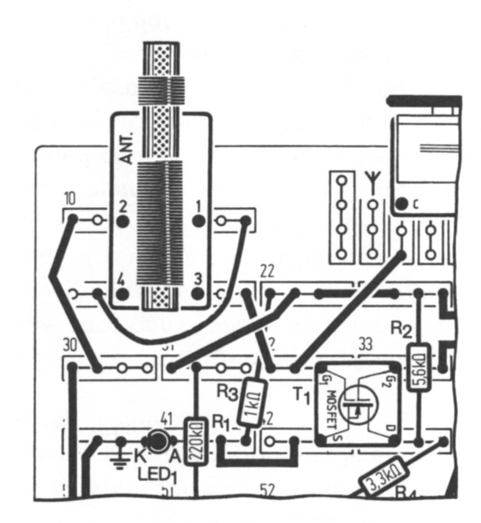


Bild 207 Aufbauten zu Bild 206 (2).

Schaltungstricks mit Spulen

Auch durch trickreiches Hintereinanderschalten von Spulen kann die Induktivität verändert werden. Nachdem wir bei Aufbau 204 auf einen Sender scharf abgestimmt haben, schalten wir die beiden auf der Ferritantenne befindlichen Spulen so hintereinander, daß Anschluß 1 mit Anschluß 4 verbunden, und der Empfänger an Anschluß 3 und 2 (2 an Masse) angeschlossen wird (Bild 207). Die Reihenschaltung von Spulen vergrößert die Gesamtinduktivität. Das merken wir daran, daß wir, um den Sender wieder richtig empfangen zu können, den Drehko zu geringerer Kapazität hin verstellen müssen. Völlig anders dagegen verhält es sich, wenn wir die Spulen in einer anderen Reihenfolge hintereinanderschalten. Wir verbinden Anschluß 1 mit 3 und schließen den Empfänger an 4 und 2 (2 an Masse) an (Bild 208). Jetzt müssen wir den Drehko zu größerer Kapazität hin verstimmen. Wir folgern daraus messerscharf, daß die Gesamtinduktivität kleiner geworden sein muß. Wie ist das möglich? Auch hier sind doch die beiden Spulen hintereinandergeschaltet?!

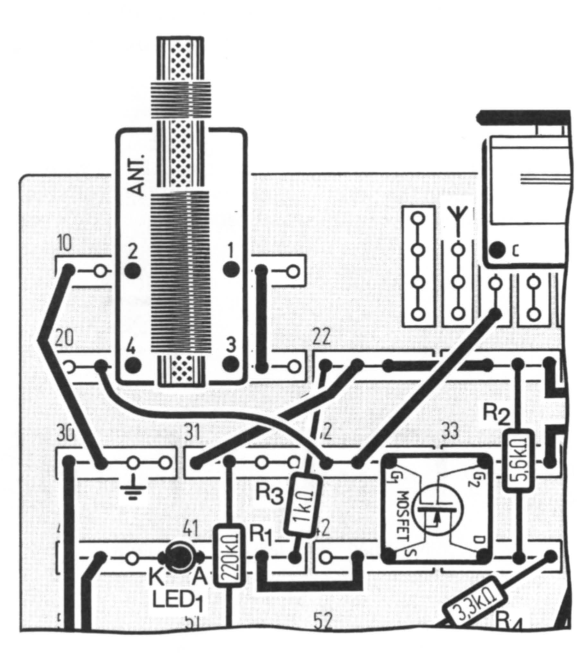


Bild 208. Aufbau zu Bild 206 (3).

Ihr habt sicher schon bemerkt, daß unsere Radios nicht im entferntesten in der Lage sind, Vaters HiFi-Turm das Wasser zu reichen. Selbst gegen ein billiges Taschenradio sehen sie „alt" aus. Selbstbau hin, Selbstbau her, sie könnten bessere Trennschärfe haben! Deshalb wollen wir unseren Streifzug durch die historischen Empfängerschaltungen jetzt beschließen. Aber, um gerecht zu sein, sie waren ideal geeignet, um die notwendigen Grundlagen zu erarbeiten.

7. Gut gemixt: Die moderne Funktechnik

Der Weg zu besserer Trennschärfe führte zunächst zur Entwicklung von Empfängern mit mehreren gekoppelten Schwingkreisen.

Aber aufgrund der schwierigen Bedienung fand man nicht so recht Freude an ihnen. Man stelle sich vor: Beim Abstimmen auf einen anderen Sender muß jeder Schwingkreis exakt auf die gleiche Frequenz abgestimmt werden! Um die Sache zu vereinfachen, kann man Drehkos mit mehreren Plattenpaketen auf einer Achse benutzen. Dann allerdings liegt der Schwarze Peter beim Hersteller: Der Techniker im Prüffeld muß mit enorm hohem Aufwand an Meßgeräten den Gleichlauf der Schwingkreise erreichen. Not macht bekanntlich erfinderisch, und so war es ein wirklich pfiffiger Trick, der die Entwicklungsabteilungen in aller Welt eroberte: Filter mit hoher Trennschärfe, also mehrere gekoppelte Schwingkreise, sind einfacher herzustellen, wenn sie fest auf eine möglichst niedrige Frequenz abgestimmt sind. Die Frage ist lediglich: Wie bringt man die Rundfunksender – die ja bekanntlich auf unterschiedlichen Frequenzen arbeiten – dazu, sich durch ein Bandpaßfilter fern von ihrer Arbeitsfrequenz zu quälen? Wir müssen die Frequenz des Senders schlicht und ergreifend auf eine Frequenz umsetzen, die uns besser ins Konzept paßt! Der gleiche Vorgang, wie wir ihn bei der Amplitudenmodulation angewendet haben, hilft uns hier weiter! Dazu muß man nur die empfangenen Sendefrequenzen mit einer anderen, im Empfänger erzeugten Frequenz so mischen, daß die Differenz der Frequenzen durch das Bandpaßfilter paßt.

Sendertechnik im Empfänger: Das ist Super

Empfänger, die nach dem Prinzip der Frequenzmischung arbeiten, heißen zungenbrecherisch Superheterodynempfänger. Leider werden sie auch völlig falsch Überlagerungsempfänger genannt. Eine Überlagerung ist keine Frequenzmischung! Richtiger wären die Bezeichnungen Umsetz- oder Mischempfänger. Am häufigsten werden die Kurzformen Superhet oder Super verwendet. Betrachten wir das Blockschaltbild eines Supers (Bild 209): Der Schwingkreis am Antenneneingang hat jetzt ein leichtes Spiel. Er muß nur noch eine grobe Vorauswahl treffen (RF). Schließlich ist es nicht notwendig, daß in einem Mittelwellenradio auch noch die Fernsehsender herumspuken. Auf die Vorselektion folgt die Mischstufe (Mixer). Hier erfolgt die eigentliche Frequenzumsetzung. Dazu braucht man noch eine weitere, am Ort erzeugte Frequenz. Dies erledigt ein Oszillator (LO), genannt Lokal-Oszillator (von lat. locus: der Ort). Aus der Mischstufe kommen im wesentlichen zwei Frequenzen heraus, nämlich die Summe LO + RF und die Differenz LO – RF. Da mit Schwingkreisen bekanntlich auf niedrigen Frequenzen die beste Selektion erreicht werden kann, wird das nachfolgende Bandpaßfilter auf die Differenzfrequenz abgestimmt. Sie kann deshalb durch das Filter flutschen, während die Summenfrequenz unterdrückt wird. Das Endziel ist natürlich, wie beim Geradeausempfänger, die AF(NF). Die soeben erzeugte Frequenz ist nur ein Zwischenprodukt. Sie wird infolgedessen Zwischenfrequenz, abgekürzt ZF genannt. Im Zeitalter der Völkerverständigung benutzen wir besser die international übliche Abkürzung IF für **I***ntermediate* **F***requency.*

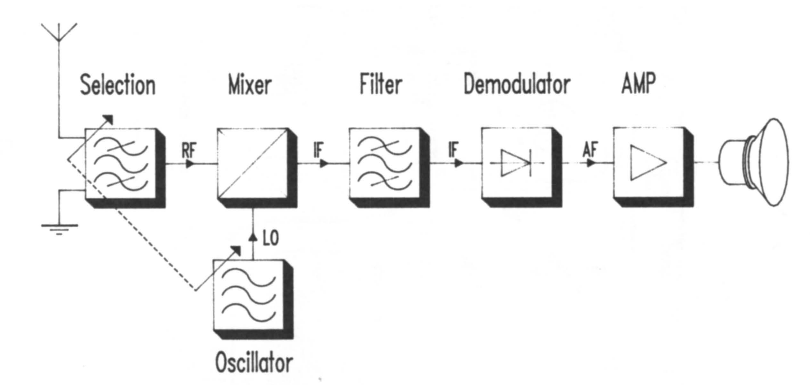


Bild 209. Das Blockschaltbild eines Supers. Das von der Antenne aufgenommene Hochfrequenzsignal (RF) wird mit einem zweiten, im Empfänger erzeugten Hochfrequenzsignal (LO) so gemischt, daß die Differenzfrequenz (IF) durch ein fest abgestimmtes Zwischenfrequenzfilter paßt. Danach wird wie gewohnt demoduliert und verstärkt.

Mischstufe = Modulator

So wie bei unserem AM-Sprechfunksender könnten wir natürlich auch hier den MOSFET als Mischstufe einsetzen. In der Röhrentechnik wurden die Radios auch genauso aufgebaut, nämlich mit Röhren, die wie ein MOSFET mehrere Steuer-Elektroden hatten.

Aber wir wollen jetzt den Schritt in die moderne Technik machen. Der MOSFET bildet zwar einen sehr einfachen, aber nicht gerade perfekten Modulator. So wie der König der Verstärker ein symmetrischer Verstärker war, eben der Differenzverstärker, so ist der König der Modulatoren (oder Mischer) ebenfalls ein symmetrischer Mischer, und der besteht in der Regel aus mehreren Differenzverstärkern, die überkreuz miteinander verbunden sind. Unser Mixermodul enthält einen solchen Doppelgegentaktmodulator. Symmetrische Mischschaltungen sind zum Standardbauteil der modernen Funktechnik geworden. Es gibt fast keine Anwendung, die nicht mit ihnen erledigt werden könnte. Deshalb werden wir uns jetzt besonders ausführlich mit ihnen befassen.

Experimente

Weichenstellung: Vier Wege durch den Mixer

Wir können uns das Mixermodul wie das Gleisbild eines großen Rangierbahnhofes vorstellen; es besteht aus mehreren Weichen. Zur Verdeutlichung haben wir im rechten Teil des Bildes 210 die Transistoren als einfache Schalter dargestellt. Wir bauen den Versuch zunächst nach Bild 212 auf. Dem RF-Anschluß 1 des Mixermoduls führen wir den Ausgang eines Multivibrators zu, den wir in schon bekannter Weise mit dem AMP-Modul realisieren. Der RF-Anschluß 2 wird dagegen auf Masse gelegt. Der LO-Eingang erhält über R4 Plusspannung. Dadurch wird der interne Transistor Q1 vorbereitend durchgeschaltet, ebenso Q3 (siehe dazu Bild 210, linker Teil). Der Multivibrator schaltet mit seiner Rechteckspannung den internen Transistor Q5 ständig ein und aus. Die Folge davon ist, daß LED1 gleichmäßig blinkt. Mit Poti P1 läßt sich die Blinkfrequenz stufenlos verändern. Durch Drücken des Tasters Ta1 werden „einige Weichen umgeworfen". Jetzt sind die internen Transistoren Q2 und Q4 vorbereitend leitend geschaltet. Zwar wird Q5 nach wie vor durch den Multivibrator ein- und ausgeschaltet, aber jetzt blinkt LED2. Durch die Differenzverstärkeranordnung im Mixermodul werden jeweils alle Transistoren umgeschaltet. Wer vorher leitend war, ist jetzt gesperrt und umgekehrt (Bild 211).

Phasenumkehr

Wir verändern den Aufbau derart, daß der RF-Eingang 1 des Mixers jetzt an Masse liegt und das Rechtecksignal des Multivibrators dem RF-Eingang 2 zugeführt wird (die beiden mit X bezeichneten Drahtbrücken werden gemäß Bild 215 umgesteckt). Bei nichtbetätigtem Taster Ta1 blinkt jetzt LED2 (Bild 216). Da Q5 nun gesperrt ist und Q6 das Tasten übernimmt, führt der Weg folgerichtig über den vorbereitend leitend geschalteten Transistor Q3. Es ist sicherlich nicht schwer zu erraten, daß beim Drücken von Ta1 nun das Blinken zu LED1 hinüberwechselt (Bild 217). Geschwollen ausgedrückt, können wir sagen, daß jeder Eingang zum jeweils anderen 180 Grad Phasenverschiebung aufweist, das ist der Haupttrick eines Doppelgegentaktmodulators.

Geschicklichkeitsspiel

Das Wort Versuch gilt hier wörtlich. Man weiß vorher nicht, ob er gelingt. Er könnte auch als Aufnahmeprüfung für die Funkerschule dienen. Mit P1 in Aufbau 212 stellen wir eine relativ niedrige Blinkfrequenz ein, und jetzt kommt's: Wir drücken rhythmisch auf Taster Ta1 und versuchen, mit der Frequenz des Blinkens zu tasten. Wem es gelingt, immer in Gegenphase zu drücken, kann beobachten, daß beide Leuchtdioden mit der doppelten Frequenz blinken. Bei Abweichungen von der „Phasenlage" und Frequenz können interessante Blinkmuster erzeugt werden. Aber was soll die Handarbeit? Wir lassen jetzt elektronisch tasten!

Frequenzmischung durch gegenseitiges Umschalten

Die Handbetätigung diente nur zur Demonstration der vier Möglichkeiten für den Strom, durch den Mixer zu fließen. Die Bestimmung eines Mixers ist es natürlich, daß seinen Eingängen zwei Frequenzen zugeführt werden. Jeder Eingang versucht, dem jeweils anderen einen anderen Ausgang zuzuweisen. Das Ganze stellt also eine Art elektronischen Irrgarten dar. Kein Signal weiß, an welchem Ausgang es im nächsten Moment herauskommt. Aber es ist ein Chaos mit System.

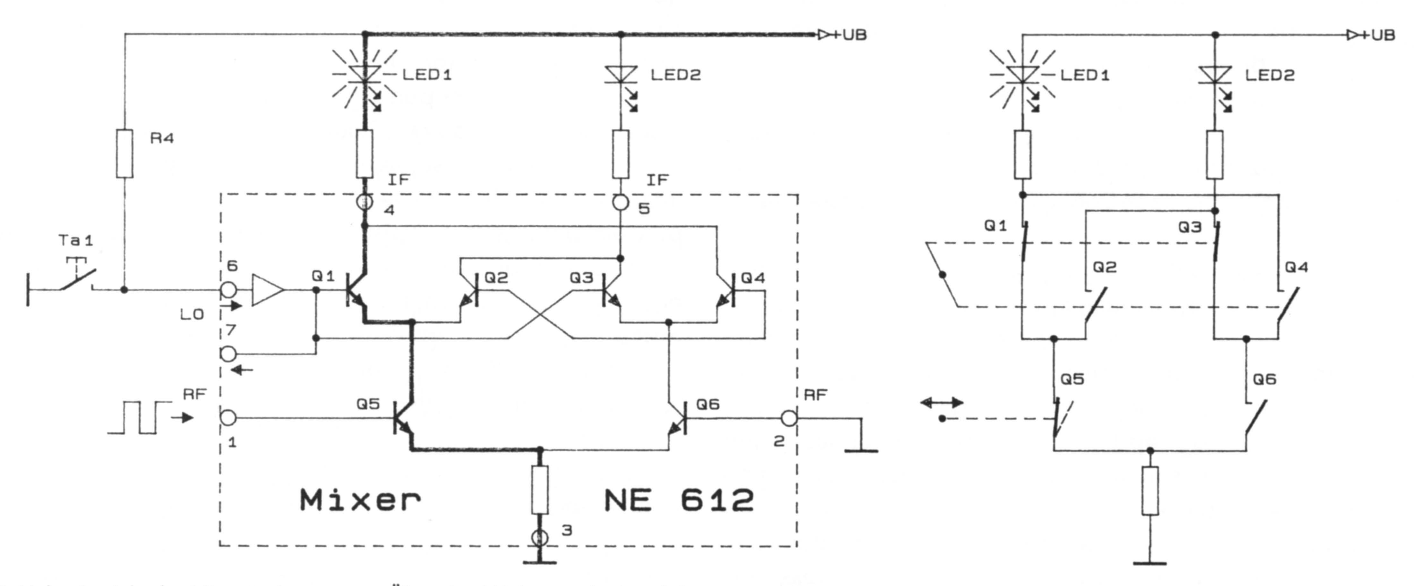


Bild 210. Links: So sieht der Mixer im Innern aus. Über den Widerstand R4 sind die internen Transistoren Q1 und Q3 vorbereitend leitend geschaltet. Der Multivibrator am RF-Anschluß 1 „tastet" Q5. Infolgedessen blinkt LED1. Rechts: Der Vorgang läßt sich besser verstehen, wenn man sich die Transistoren als Schalter vorstellt.

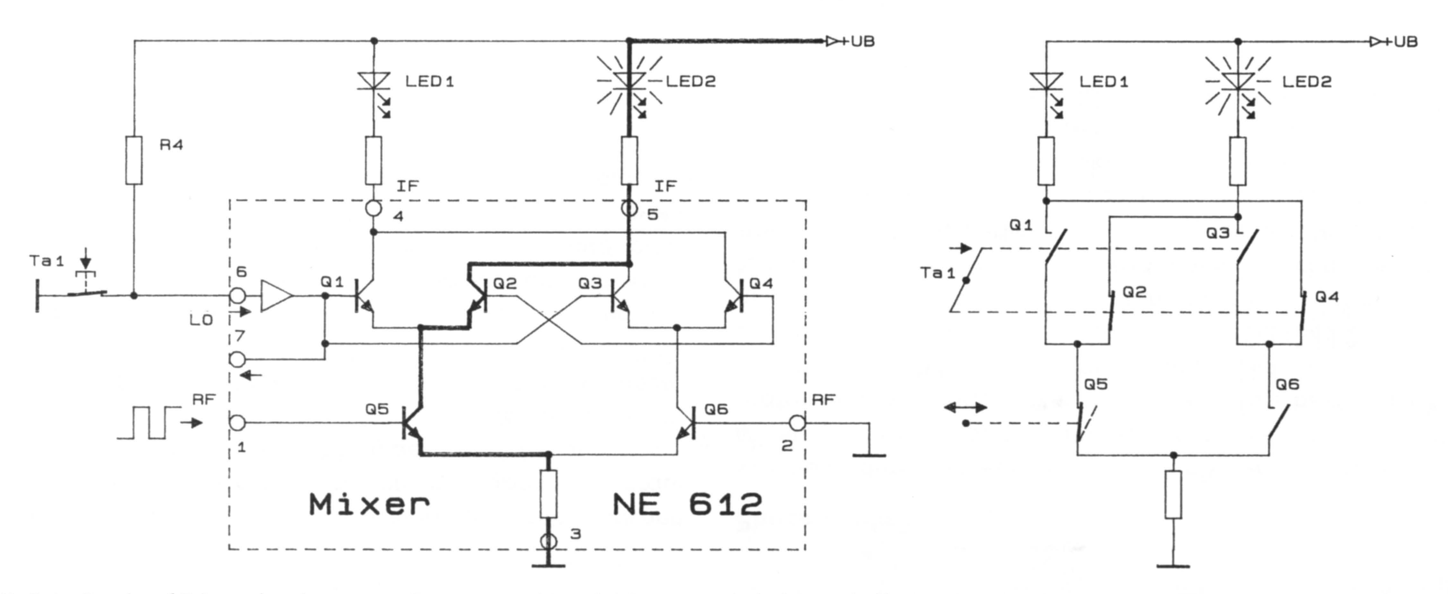


Bild 211. Beim Druck auf Ta1 werden die internen Transistoren Q1 und Q3 gesperrt (Schalter sind offen). Q2 und Q4 werden dagegen durchgeschaltet. Der ein- und ausschaltende Transistor Q5 läßt jetzt LED2 blinken.

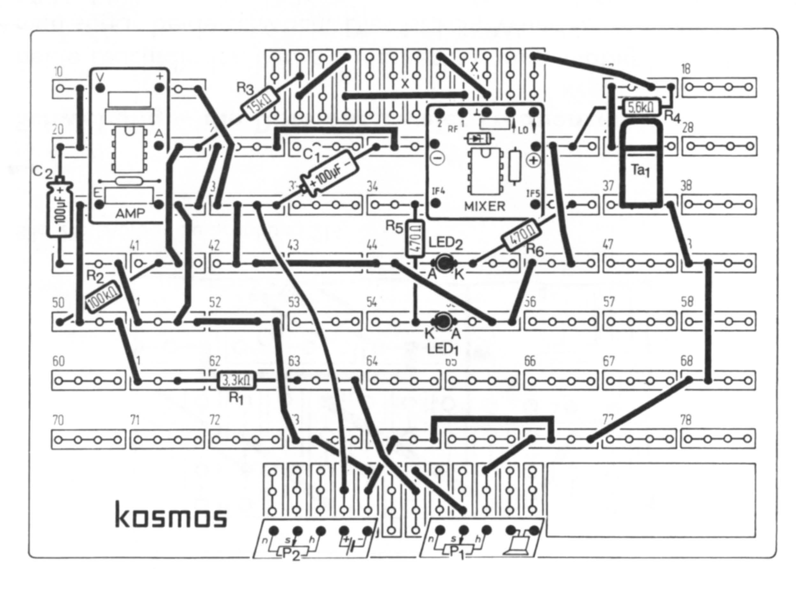


Bild 212. Aufbau zu Schaltung 213.

Experimente

Normalfrequenz aus der Luft

Die zur Mischung notwendige zweite Frequenz holen wir uns einfach aus der Luft! Zwar fängt eine Antenne bekanntlich eine Unzahl von verschiedenen Frequenzen ein, aber das elektromagnetische Feld der Wechselstromleitungen ist das weitaus stärkste. Bekanntlich tritt der Wechselstrombrumm bei jedem Verstärker auf, an dessen Eingang sich ein unabgeschirmter Draht befindet oder auch nur, wenn wir den Eingang mit dem Finger berühren. Die Transistoren T 1 und T2 Bild 218 (Aufbau 219) verstärken das Brummsignal so stark, daß am Kollektor von T2 ein Rechtecksignal von 50 Hz zur Verfügung steht. Der Brumm ist im Hörer (EP) zu hören. Damit der Multivibrator ebenfalls bis über 50 Hz hinaus abgestimmt werden kann, muß C2 gegen einen 10-μF-Kondensator gewechselt werden. Das Signal des Multivibrators ist im Lautsprecher (SP) zu hören.

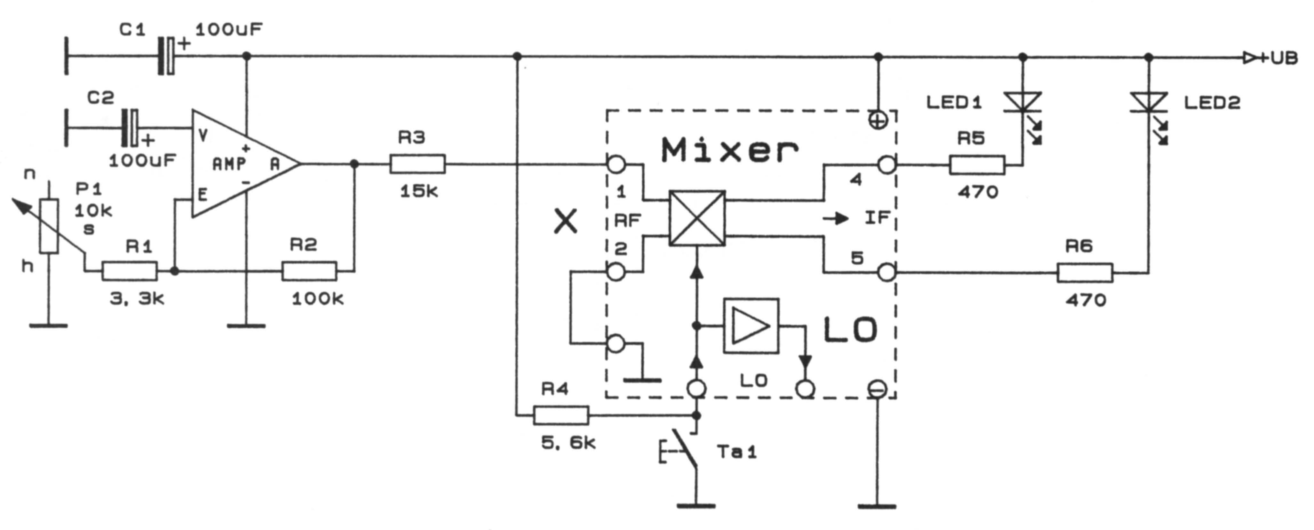


Bild 213. Wir benutzen das Mixermodul als elektronische Weiche; der Multivibrator ist am RF-Eingang 1 angeschlossen.

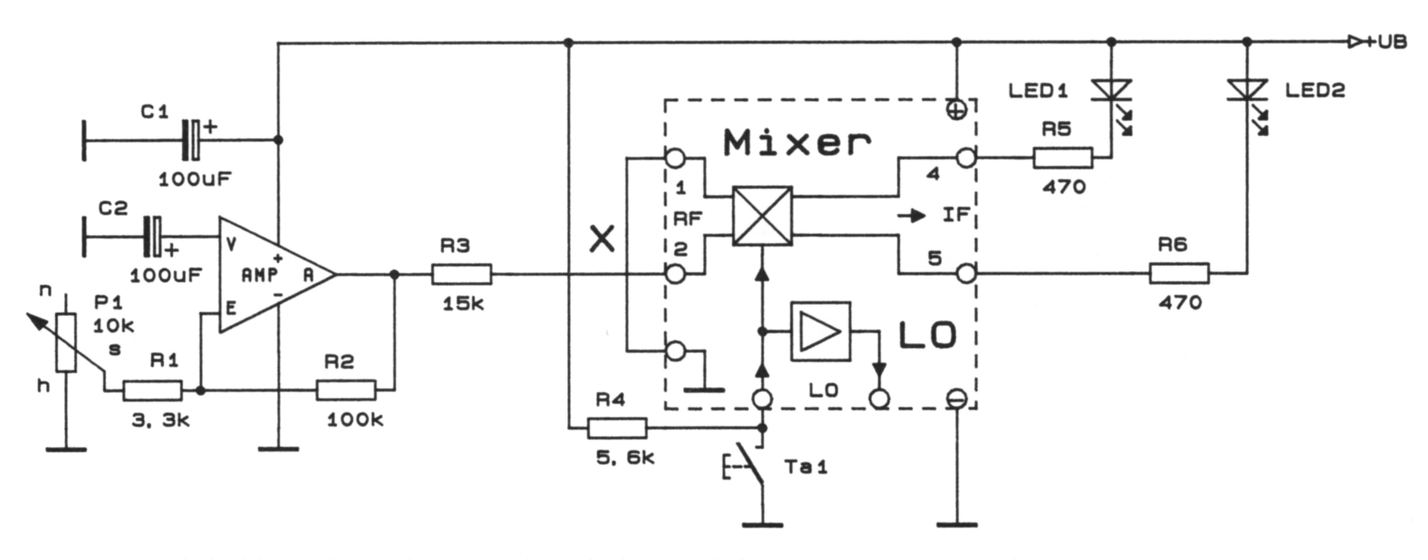


Bild 214. Das Mixermodul als elektronische Weiche, jetzt ist der Multivibrator jedoch am RF-Eingang 2 angeschlossen.

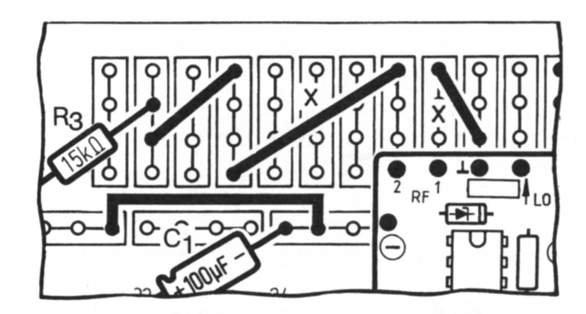


Bild 215. Aufbau zu Schaltung 214.

Schwebung – die Differenz zweier Frequenzen

Beide Leuchtdioden blinken jetzt recht unregelmäßig bzw. glimmen sogar beide schwach. Dies ist kein Wunder, denn eine mit 50 Hz blinkende Leuchtdiode erscheint für uns als Dauerlicht, wir können die einzelnen Impulse nicht mehr auflösen. Nun drehen wir langsam P1 durch, d.h. wir verändern die Frequenz des Multivibrators. Etwa bei Stellung „3" beginnen die Leuchtdioden, langsamer zu blinken, obwohl, wie deutlich hörbar, die Frequenz des Multivibrators ansteigt. Mit dem Ton des Hörers in einem Ohr und dem des Lautsprechers im anderen können wir feststellen, daß sich die beiden Frequenzen jetzt nähern. Bei absoluter Frequenzgleichheit verschwindet das Geflimmere der Leuchtdioden. Allenfalls ist noch ein langsames Auf- und Abschwellen festzustellen. Bei weiterem Erhöhen der Multivibratorfrequenz beginnt das Blinken sofort wieder hin- und herzuwandern, um schließlich zu einem gleichmäßigen Glimmen zu verschmelzen. Wenn sich die Frequenzen nahekommen, ohne exakt gleich zu sein, wechselt das Leuchten von einer Diode zur anderen mit der Differenzfrequenz der beiden Frequenzen. Dabei ist es unerheblich, ob die LO-Frequenz über oder unter der RF-Frequenz liegt. Es kommt nur auf die Differenz der beiden an.

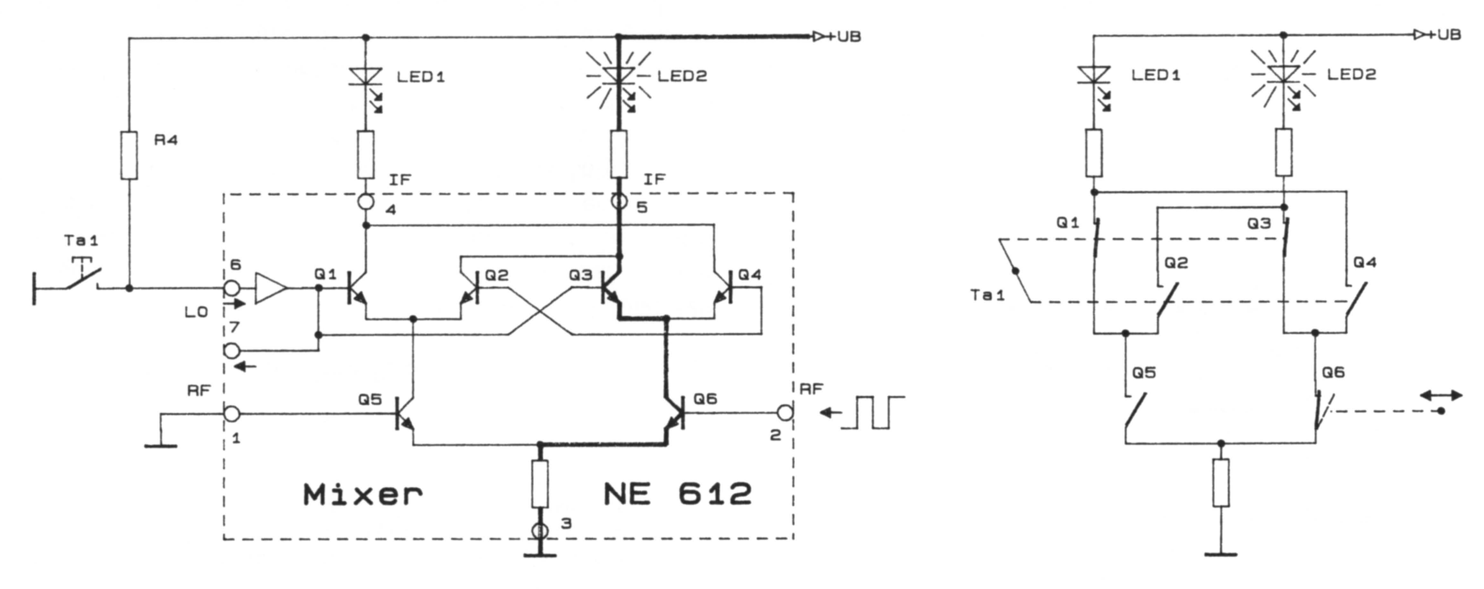


Bild 216. Beim Anschluß des Multivibrators an den RF-Eingang 2 kehren sich die Vorgänge um: Der tastende Transistor Q6 nutzt bei offenem Taster den Weg über Transistor Q3, um LED2 zum Blinken zu bringen...

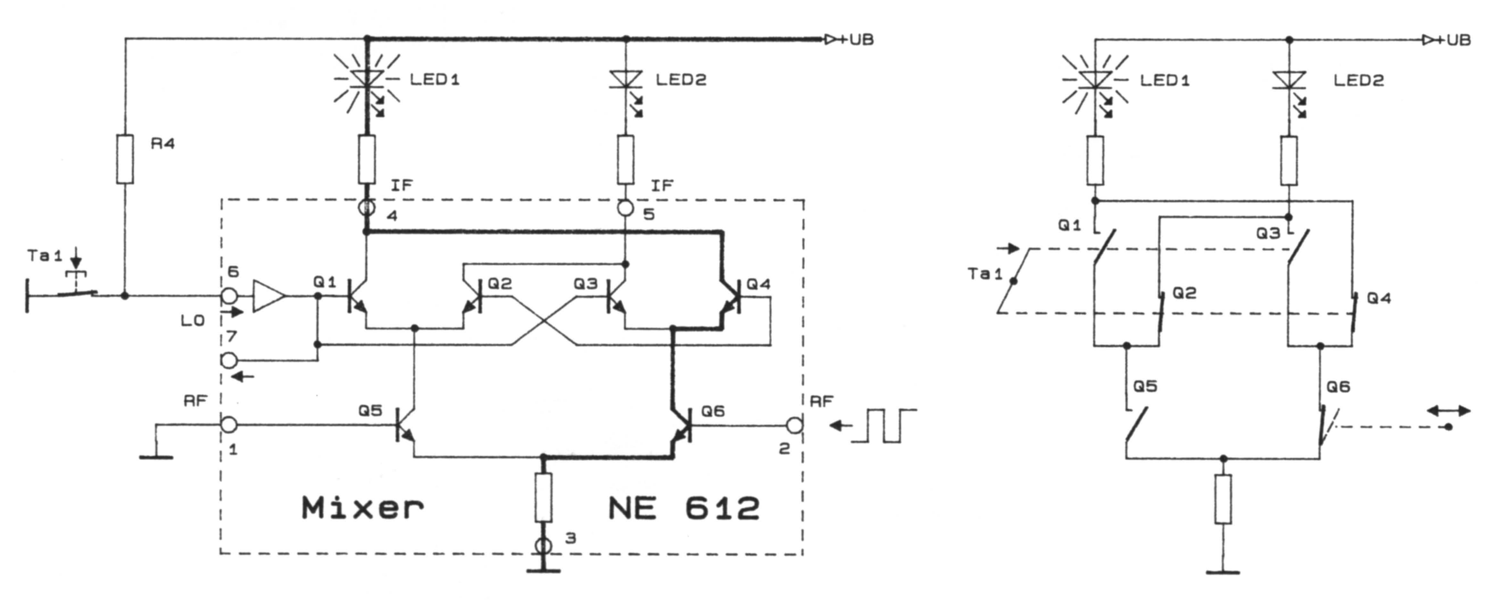


Bild 217. ... um bei gedrücktem Taster Ta1 über Q4 LED 1 "anzumachen".

Know-how: Elektronischer Stroboskopeffekt

Sicher habt Ihr schon mal im Kino bei Cowboyfilmen das Rückwärtsdrehen der Postkutschenräder bemerkt. Das liegt daran, daß der Film pro Sekunde 24 Bilder zeigt (das Fernsehen sogar 25), während bei drehenden Rädern mehr als 25 Speichen pro Sekunde an einer bestimmten Stelle vorbeikommen. Man kann also mit Fug und Recht von einer Speichenfrequenz sprechen. Unser Auge nimmt nur die Differenzfrequenz wahr und wird deshalb über die Drehrichtung der Räder getäuscht. Das nennt man nach seinem Entdecker den Stroboskopeffekt. Der Stroboskopeffekt ist ebenfalls im Spiel, wenn im Fernsehen ein Film gezeigt wird, in dem ein anderer Fernsehapparat zu sehen ist. Aufgrund der unterschiedlichen Bildwechselfrequenzen (24 Hz beim Film und 25 Hz beim Fernsehen) wandert der waagerechte Balken – das ist die Trennungslinie zwischen zwei Bildern – mit der Differenzfre-

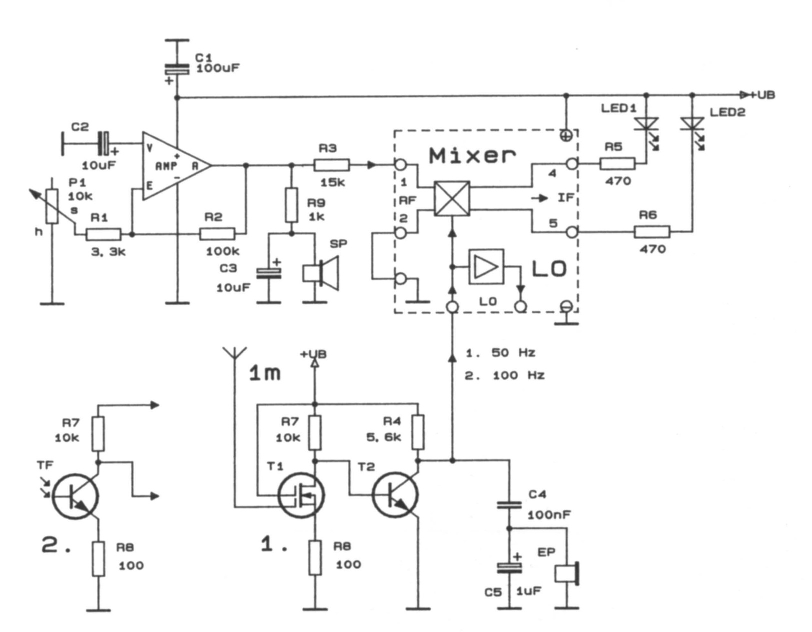


Bild 218. Wir mischen zwei Frequenzen: Am LO-Eingang liegt eine feste Frequenz von 50 Hz, während der Multivibrator dem RF-Anschluß 1 eine variable Frequenz zuführt. Bei Frequenzgleichheit geht das aufgeregte Blinken der LED in ein langsames „Schweben" über.

Schwebung bei der doppelten Frequenz

Wir ersetzen den MOSFET durch den Fototransistor TF (Bild 220) und beleuchten ihn schwach mit einer abseits stehenden Schreibtischlampe oder einer Leuchtstoffröhre so, daß beide Leuchtdioden gleichmäßig leuchten. Es ist sehr wichtig, daß der Fototransistor nicht durch Tageslicht oder eine zu starke Lampe völlig durchgesteuert wird. Es funktioniert am besten, wenn wir das Zimmer abdunkeln. Da der Wechselstrom, der durch die Lampe fließt, in jeder Sekunde 50mal seine Richtung wechselt, also hin- und zurückfließt, schwankt der von der Lampe ausgehende "Lichtstrom" mit 100 Hz, denn einer Lampe ist es egal, ob der Strom von links oder von rechts durch den Glühfaden fließt. Am Kollektor von T2 hören wir deshalb einen 100-Hz-Brumm im Ohrhörer. Wenn der Multivibrator auf 50 Hz abgestimmt ist, beobachten wir jetzt nur noch eine Andeutung einer Schwebung, die von der ersten Oberwelle des Multivibrators erzeugt wird. Die richtige Schwebung ist aber wieder bei einer Einstellung auf 100 Hz zu beobachten. Dazu muß P1 fast bis in Stellung „6" gebracht werden. Bemerkung: Es kann nützlich sein, die beiden Kondensatoren C2 und C3 gegeneinander auszutauschen. Denn obwohl auf beiden 10-μF steht, können sie doch geringfügig unterschiedlich sein. Wenn es mit einem nicht gelingt, auf 100 Hz zu kommen, so kann es vielleicht der andere schaffen.

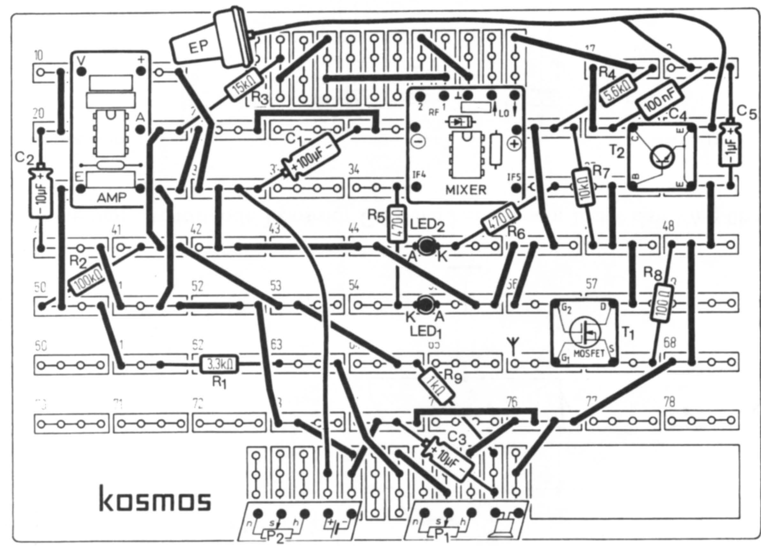


Bild 219. Aufbau zu Schaltung 218.

Schwebungsempfang

Jetzt entführen wir aber endlich den Mischer in den Hochfrequenzbereich. Mit „an Bord" des Mixers befindet sich ein Verstärker. In dem vereinfachten Schaltbild, das wir zur Erklärung benutzt haben, ist er durch ein Dreieck am LO-Eingang angedeutet. Was liegt näher, als diesen Verstärker statt der bislang

quenz von 1 Hz über den Bildschirm. Im Mixer wird das schnelle 50 Hz-Blinken der Leuchtdioden so rasch von einer zur anderen Leuchtdiode umgeschaltet, so daß unser Auge nur die Differenzfrequenz wahrnimmt. Man nennt die Differenzfrequenz auch Schwebung. Bei Frequenzgleichheit spricht man von Schwebungs-Null. Man kann auch sagen, daß zwei Frequenzen zu Null Hz (= Gleichspannung) gemischt werden.

verwendeten Einzeltransistoren für die Erzeugung der LO-Frequenz (der Oszillator-Frequenz) auszunutzen (Bild 222). Als Rückkopplungsnetzwerk mit Schwingkreis benutzen wir das MF-Modul. Es bildet zusammen mit dem integrierten Verstärker einen Meißner-Oszillator, einen alten Bekannten also. Das Mixermodul hat bereits eine saftige Verstärkung. Wenn am RF-Eingang – ob Anschluß 1 oder 2 ist völlig egal – eine kurze Drahtantenne angeschlossen ist, schlagen bestimmt einige Rundfunksender durch. Beim Durchdrehen des Drehkos, d.h. beim Abstimmen des Oszillators LO, hören wir an bestimmten Stellen grelle Pfeiftöne. Wir entfernen die Drahtantenne aber wieder, denn sie diente nur zum Funktionstest der Schaltung.

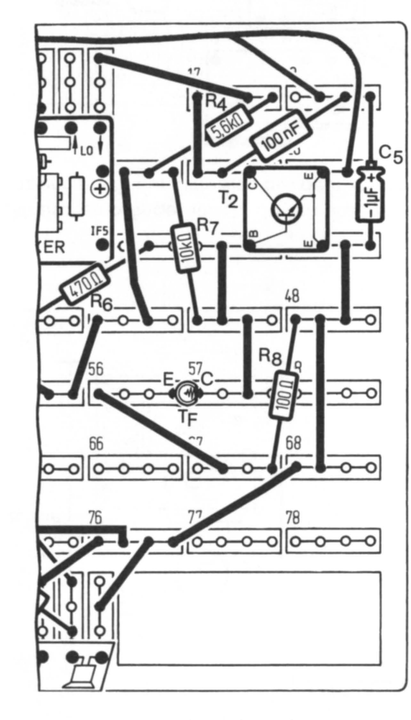


Bild 220. Der Fototransistor TF setzt das Schwanken eines (Wechselstrom-)Lichtes in eine 100 Hz-Frequenz um. Es kann recht schwierig sein, den richtigen Abstand zur Lampe einzustellen. Auch darf kein Fremdlicht stören. Der Erfolg ist am Flackern der LED zu erkennen.

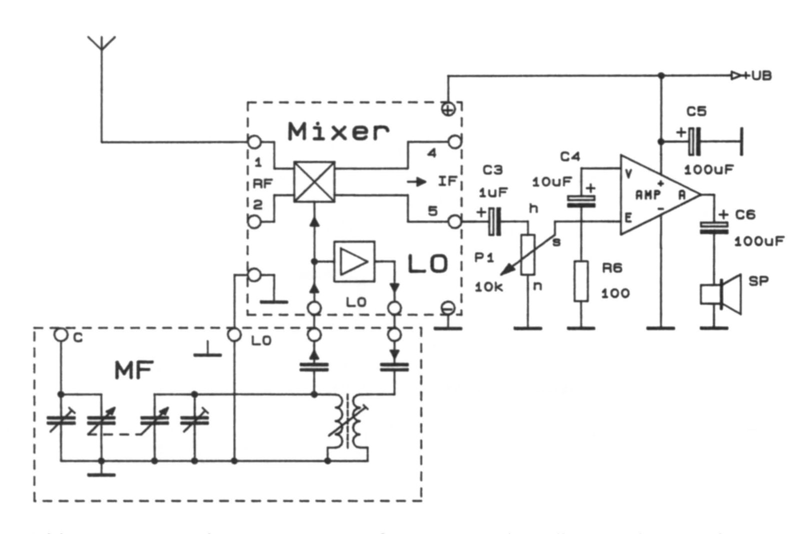


Bild 221. Die von der Antenne eingefangenen Radiowellen werden mit der LO-Frequenz gemischt. Wenn die LO-Frequenz einer empfangenen Frequenz nahekommt, ist im Lautsprecher der Frequenzunterschied als Pfeifton zu hören.

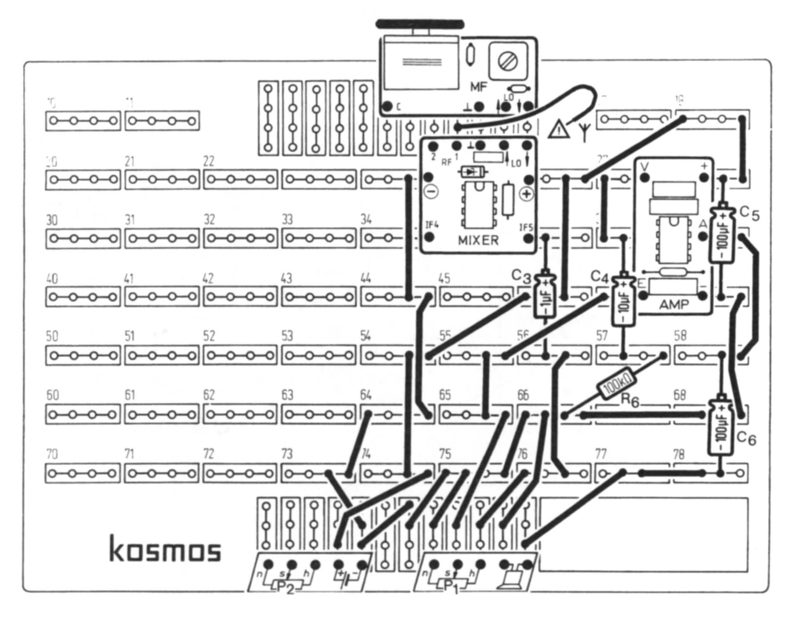


Bild 222. Aufbau zu Schaltung 221.



Know-how: Amplitudenmodulation ist Frequenzmischung

Bei einer Schwebung kommt als Ergebnis der Mischung immer nur die Differenz und nicht die Summe der beiden Frequenzen zum Tragen. Man spricht in solchen Fällen von Abwärtsmischung. Bei unserem AM-Sprechfunksender haben wir aber auch schon mit beiden Mischprodukten gearbeitet. Technisch betrachtet, wird in einem Amplituden-Modulator die RF-(HF-)Spannung mit der AF-(NF-)Spannung multipliziert. Nichts anderes nämlich ist die Frequenzmischung. Nehmen wir an, unser Sender arbeitet auf 550 kHz, und wir pfeifen in das Mikrofon einen sauberen 1000 Hz-Ton. Am Ausgang des Modulators erscheinen dann Summen- und Differenzfrequenzen: also 551 kHz und 549 kHz (Bild 226). Ein Träger kommt mit einer einzigen Frequenz aus, eben mit seiner Trägerfrequenz. Das mit einem Ton modulierte Signal aber besteht schon aus drei Frequenzen. Mit

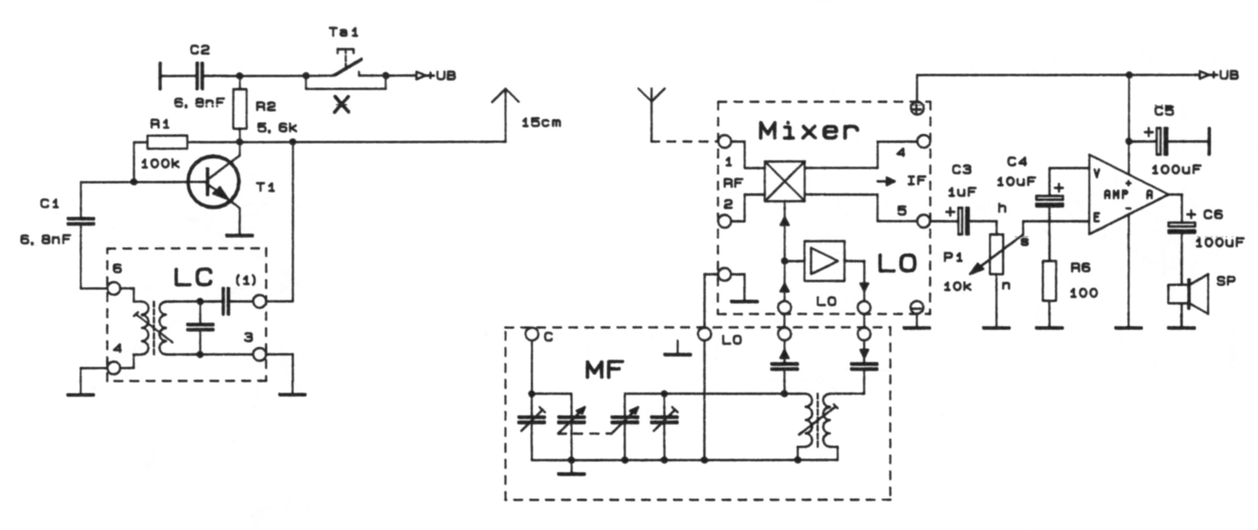


Bild 223. Ein Direktmischempfänger mischt das empfangene Signal direkt in den Niederfrequenzbereich ohne den Umweg über die Zwischenfrequenz. Die Tonhöhe der Niederfrequenz entspricht der Differenz aus dem empfangenen RF- und dem LO-Signal. Nach Entfernen der Drahtbrücke X wird der Oszillator zum Morsesender.

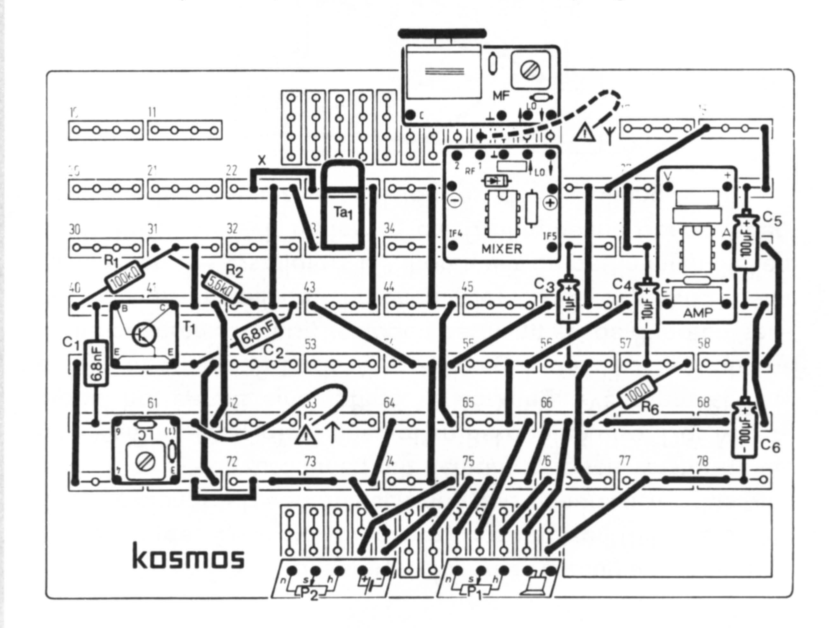


Bild 224. Aufbau zu Schaltung 223.

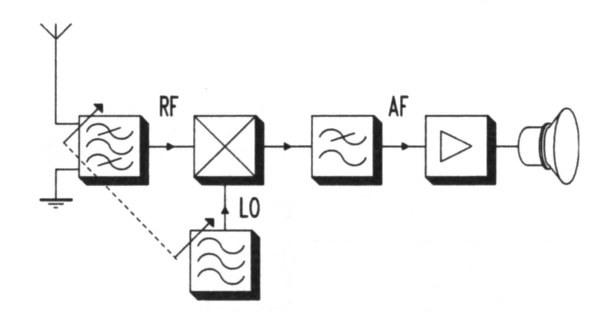


Bild 225. Das Blockschaltbild eines Direktmischempfängers: Da die „Zwischenfrequenz" im hörbaren Bereich liegt, genügt anstelle des Zwischenfrequenz-Bandpasses ein Niederfrequenz-Tiefpaß. Direktmischempfänger sind sehr einfache aber äußerst leistungsfähige Empfänger für Morsesignale.

Sprache oder Musik beladen benötigt es sogar ein ganzes Frequenzband. Unsere AM-Rundfunksender übertragen als höchste Modulationsfrequenz 4,5 kHz. Die Kanalbandbreite für AM-Rundfunksender beträgt demnach ± 4,5 kHz, also insgesamt 9 kHz (Bild 227).

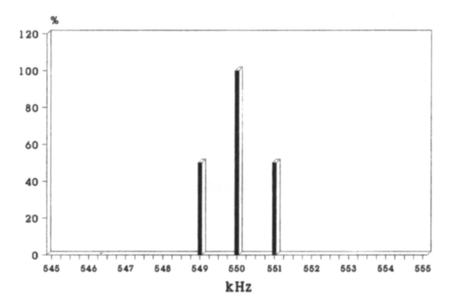


Bild 226. Mischung und Amplitudenmodulation sind dasselbe. Wenn ein 550 kHz-Träger mit einem 1 kHz-Niederfrequenzsignal moduliert wird, bilden sich Seitenlinien bei 551 kHz und bei 549 kHz, also ebenfalls die Summen- und die Differenzfrequenz wie bei der Frequenzmischung.

Direktmischempfänger

Wenn sich die Frequenzwerte zweier hochfrequenter Schwingungen so nahe kommen, daß die Differenz in den hörbaren Bereich fällt, ist die Zwischenfrequenz eine Niederfrequenz. Wir nehmen wieder unseren alten Meißner-Oszillator mit dem LC-Modul in Betrieb (linker Teil in Bild 223, der rechte Teil zeigt den Empfänger). Der Kern der Spule sollte in Aufbau 224 noch möglichst weit nach oben gedreht sein. Aber bitte wiederum größte Vorsicht: Der Kern darf nicht fest angeknallt, sondern nur ganz leicht gegen den Anschlag des Gehäuses geschraubt werden. Wir drehen den Drehkondensator auf etwa 3/4 seiner maximalen Kapazität. Nun drehen wir mit einem kleinen Schraubendreher den Kern der Spule des MF-Moduls vorsichtig durch. Bei einer bestimmten Stellung hören wir zunächst ein ganz hohes Pfeifen. Das Pfeifen wird immer tiefer (niederfrequenter), je weiter wir langsam weiterdrehen. Es wird schließlich zum tiefen Brummen und verschwindet plötzlich ganz (Schwebungs-Null!). Bei vorsichtigem Weiterdrehen tritt wiederum das Brummen auf, das sich dann weiter zu einem hellen Pfeifen entwickelt, je weiter sich die LO-Frequenz von der empfangenen entfernt. Wir haben jetzt das gleiche Verhalten wie bei unserem Schwebungsversuch mit den Leuchtdioden, nur daß hier eine Niederfrequenz von zwei Hochfrequenzschwingungen erzeugt wird. Da der Lautsprecher die ganz tiefen Frequenzen nicht wiedergeben kann, kommt es zu einer Schwebungslücke. Aber selbst bei einem idealen Lautsprecher würden wir eine Schwebungslücke von etwa 32 Hz bemerken, da unser Ohr keine Frequenzen unterhalb von 16 Hz als Ton wahrnimmt. Direktmischempfänger sind ideal geeignet, um Morsesignale (CW) zu empfangen (Bild 225).

Frequenzstabilität

Es ist eine Meisterleistung, einen frequenzstabilen Oszillator zu bauen. Mit dem Schwebungsempfänger haben wir ein äußerst empfindliches Meßgerät, um die Frequenzänderungen des Oszillators nachzuweisen. Die Frequenzstabilität hängt von vielen Faktoren ab. Wir stellen mit dem Drehko Schwebungs-Null bei Aufbau 224 ein. Sobald wir die Hand vom Einstellknopf wegziehen, pfeift es wieder. Offenbar hat die Kapazität unserer Hand den Oszillator geringfügig verstimmt. Abhilfe würde hier nur eine sorgfältige Abschirmung mit einem Metallgehäuse bringen. Mit dem Schraubendreher können wir Schwebungs-Null an der Spule besser einstellen. Aber auch hier ist die Verstimmung der Spule durch das Eisen des Schraubendrehers zu bemerken. Weiterhin hat die Höhe der Batteriespannung maßgeblichen Einfluß auf die Frequenz der Oszillatoren. Wir drehen die Lautstärke auf – sofort ändert sich wieder die Tonhöhe im Lautsprecher. Größere Lautstärke heißt höheren Stromverbrauch des AMP-Moduls, eine altersschwache Batterie kann dann ganz schön „in die Knie gehen". Die veränderte Batteriespannung bewirkt sofort eine Frequenzänderung. Aber auch die Temperatur beeinflußt die Frequenz stark. Wir blasen vorsichtig mit einem Haartrockner den Transistor T 1 an und erwärmen ihn dabei, sofort ändert sich die Frequenz. Beim Abkühlen dagegen verändert sie sich erneut in der entgegengesetzten Richtung. Die Kapazität des Transistors liegt nämlich parallel zum Schwingkreis und ist besonders temperaturempfindlich. Und schließlich ist unser Oszillator auch noch klopfempfindlich: Festes Klopfen auf die Steckplatte quittiert der Oszillator mit Frequenzsprüngen.

Echter Morseempfang

Wir entfernen die Drahtbrücke X in Aufbau 224, so daß der Taster Ta1 wirksam wird. Wir drücken den Taster und stellen am Drehko einen uns angenehmen Ton ein. Beim Morsen mit Ta1 jault der Ton im Lautsprecher ständig auf und ab. Funker sprechen von einem Chirp. Dies ist natürlich ein unerwünschter Effekt. Wir werden auch gleich Maßnahmen zu seiner Behebung besprechen. Aber, soviel wird deutlich, die ursprünglich unhörbare Hochfrequenz wird hörbar durch Mischung mit einer im Empfänger erzeugten Frequenz. Ein Oszillator, der zum Hörbarmachen von Morsezeichen verwendet wird, heißt bei Funkern BFO (**B**eat **F**requency **O**scillator). Weiterhin können wir feststel-

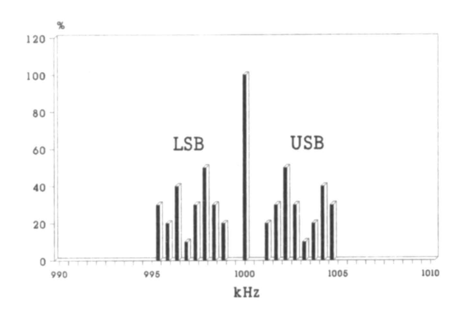


Bild 227. Wenn ein Träger dagegen mit Sprache oder Musik moduliert wird, bildet sich ein ganzes Frequenzband. Die benötigte Bandbreite entspricht der doppelten höchsten Modulationsfrequenz.

Know-how: Die zwei Seitenbänder der AM

Da die AM nach dem Prinzip der Frequenzmischung funktioniert, bilden sich (völlig unnötig) zwei Seitenbänder, die beide die gleiche Information tragen. Im Kurzwellensprechfunk unterdrückt man deshalb den Träger und ein Seitenband, bevor man „an die Antenne geht". Dadurch spart man an Bandbreite und kann im gleichen Frequenzbereich mehr Sender unterbringen. Ein Ein-Seitenband-Signal ist nur halb so

len, daß die Tonhöhe des Morsezeichens durch die Frequenz des BFO im Empfänger bestimmt wird. Wir können uns jede angenehme Tonlage selbst mit Hilfe des Drehkos einstellen.

Morsen ohne Chirps

Der Morsesender wird um eine Verstärkerstufe mit dem Transistor T2 erweitert (Bild 229). Lose Kopplung ist Trumpf! Deswegen wird T2 nur über die Kapazität einer kurzen Steckbrücke mit dem Oszillator gekoppelt (Drahtbrücke von Steckfeder 62 nach 52 im Aufbaubild endet blind!). An den Kollektor von T2 schließen wir ein 15 cm langes Drahtstück als Sendeantenne an. T2 hat weniger die Aufgabe der Verstärkung als vielmehr der Entkopplung. Änderungen an der Antenne z.B. sollen sich nicht auf die Frequenzerzeugung auswirken. Der Oszillator schwingt jetzt dauernd, stattdessen wird T2 getastet. Dies bewirkt leider den Schönheitsfehler, daß der Oszillator jetzt dauernd durchpfeift. In einem richtigen Sender wird dies durch eine gute Abschirmung verhindert. Aber die Morsesignale, die mit Ta2 erzeugt werden, klingen doch schon viel sauberer und runder. Einen Verstärker, der hauptsächlich zur Entkopplung dient, nennt man übrigens Pufferverstärker oder englisch Buffer.

Metallsuchgerät

Wir benutzen die Ferritantenne als Schwingkreis für den Meißner-Oszillator (Bild 230). Die Wicklungskapazität und die Kapazität des Transistors sowie die der Steckfedern bilden die Schwingkreiskapazität (Cs). Die Pufferstufe mit T2 benötigen wir jetzt nicht mehr, sie kann vom Steckbrett entfernt werden. Mit Hilfe des Drehkos wird zunächst die Frequenz des Oszillators gesucht, indem wir den LO auf Schwebungs-Null abstimmen. Wenn ein metallischer Gegenstand der Ferritantenne genähert wird, verstimmt sich der Schwingkreis des Oszillators und damit auch die Frequenz. Die Anwesenheit eines metallischen Gegenstandes wird also durch eine Tonhöhenänderung angezeigt.

Um der Wahrheit die Ehre zu geben, müssen wir zugeben, daß wir sowohl beim Senden mit dem LC-Modul wie auch der Ferritantenne nie die eigentliche Frequenz des Oszillators empfangen haben. Der Schwingkreis auf dem MF-Modul ist nämlich für Frequenzen höher als 1 MHz ausgelegt. Das LC-Modul wie auch die Ferritantenne haben aber lediglich Frequenzen um 500 bis 550 kHz erzeugt. Wir haben also die erste Oberwelle empfangen! Aber das ändert nichts am Prinzip der Versuche. Es führt uns wieder einmal vor Augen, wie stark doch die Oberwellen sind!

Geradeausempfänger mit Differenzverstärker

Wieso schon wieder Geradeausempfänger? Das folgende Experiment ist wichtig als Vorversuch für den Mittelwellensuper. Wir nutzen den Mischer als Differenzverstärker (Schaltung 233). In Aufbau 235 werden die Drahtbrücken X und Y zunächst eingesteckt gelassen, die gestrichelt eingezeichnete Leitung jedoch weggelassen. Da der Mischer zwei Eingänge hat, die jeweils um 180 Grad versetzt bedient werden wollen, koppeln wir an unserer bekannten MOSFET-Vorstufe sowohl an Source wie an Drain aus. Damit der Mixer nicht mischt, muß der eingebaute Oszillator durch Kurzschließen mit der Drahtbrücke X blockiert werden. Das verstärkte Signal könnten wir sowohl an Anschluß 4 wie Anschluß 5 abnehmen. Wir entscheiden uns zuerst für Anschluß 4 und stimmen auf einen Sender ab. Der Empfänger hat eine ganz erstaunliche Verstärkung. Es kann sogar vorkommen, daß starke Sender, die in der Nähe des Wohnortes liegen, verzerrt werden.

Hochfrequenz-"Lautstärke"

Um die Verzerrungen zu reduzieren, genügt es nicht, den Lautstärkesteller P1 zu bedienen, denn der Transistor T2 wird bereits kräftig übersteuert. Abhilfe kann nur eine Verminderung der Eingangsleistung „ganz vorne" bringen. Dazu machen wir mit P2 die Spannung an G2 des MOSFETs einstellbar (Schaltbild 234). In Aufbau 235 wird die Drahtbrücke Y herausgezogen und die gestrichelt eingezeichnete Leitung eingesteckt. Der MOSFET verstärkt umso weniger, je kleiner die Gate2-Spannung ist. Bei der

breit wie ein AM-Signal bei gleicher Information. Die englische (und auch sonst übliche) Bezeichnung lautet Single-Side-Band oder abgekürzt SSB. SSB kann man nicht mit einer Gleichrichterschaltung wie die AM empfangen, sondern man muß sie mittels einer Mischerschaltung wieder in die AF-(NF-)Lage zurückmischen. Die AF(NF) nennt man in der Telekommunikationstechnik auch Basisband.

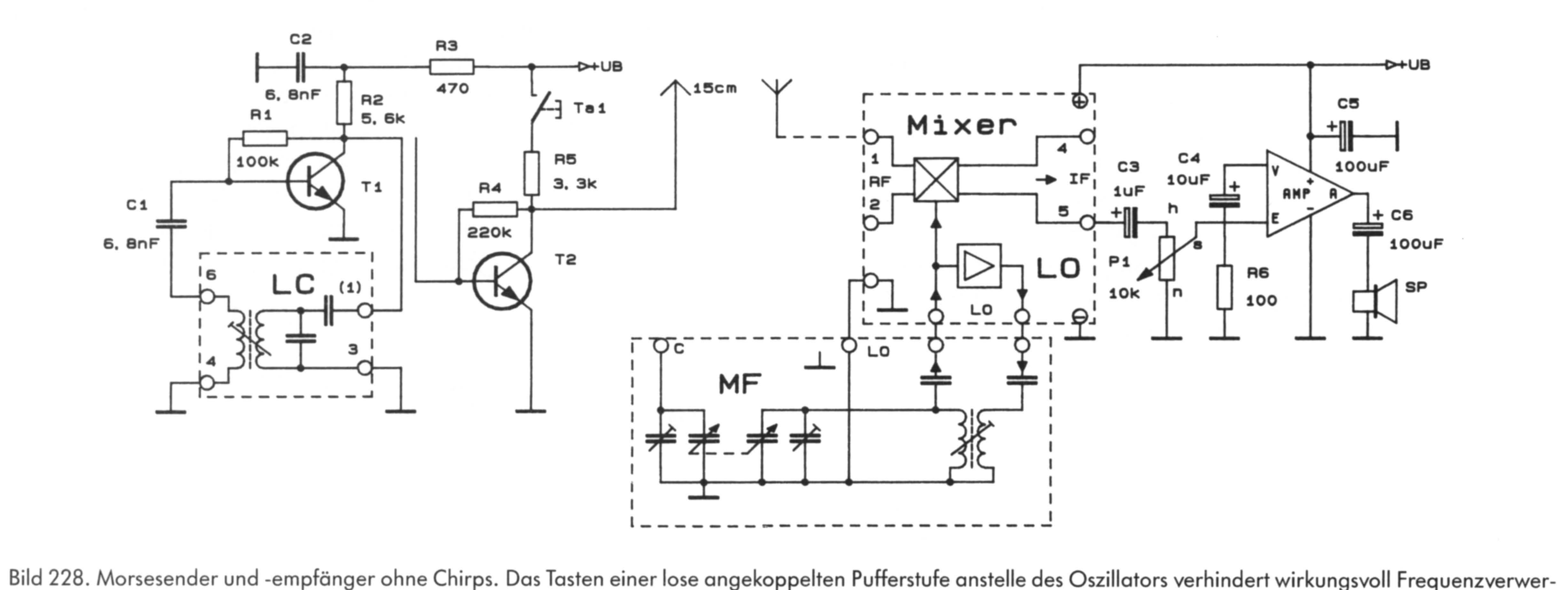


Bild 228. Morsesender und -empfänger ohne Chirps. Das Tasten einer lose angekoppelten Pufferstufe anstelle des Oszillators verhindert wirkungsvoll Frequenzverwerfungen (Chirps).

Know-how: Frequenzstabilität

Ein guter Oszillator braucht
1. einen soliden mechanischen Aufbau
2. eine gute magnetische und elektrische Abschirmung
3. eine gleichmäßige Temperatur oder besser, von der Temperatur unabhängige Bauteile (Temperaturkompensation)
4. eine sorgfältig stabilisierte Versorgungsspannung.
Frequenzverwerfung beim Morsen (Chirps) entstehen sowohl durch das Anschwingen des

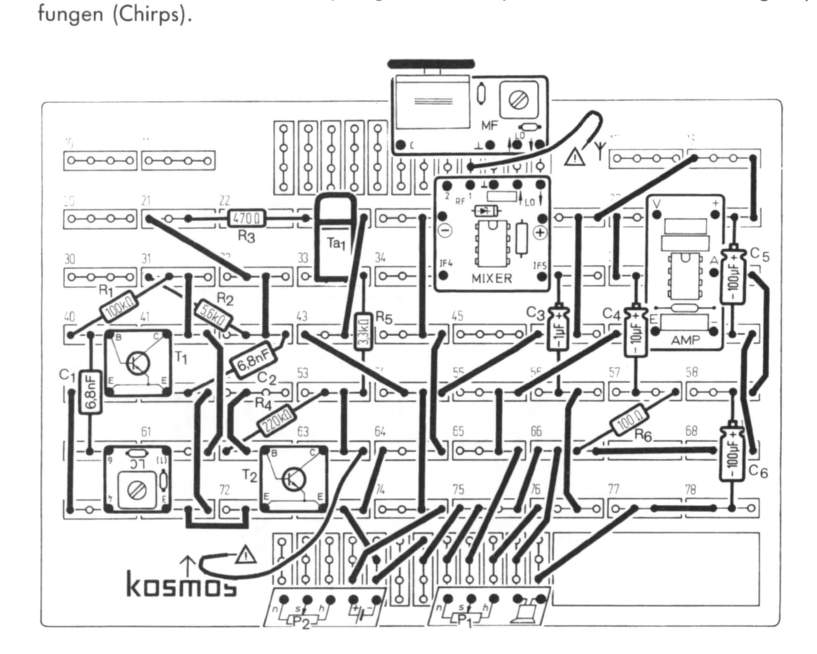


Bild 229. Aufbau zu Bild 228.

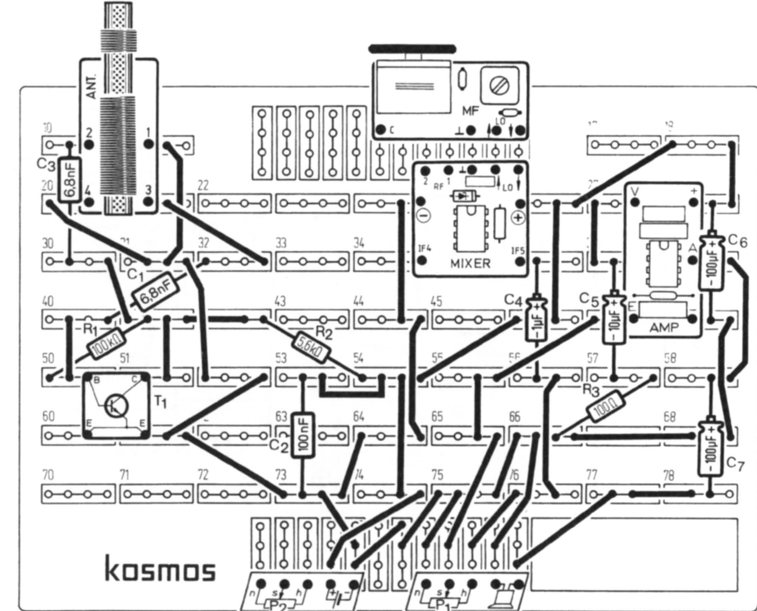


Bild 230. Aufbau zu Schaltung 231.

Oszillators wie auch durch Spannungsschwankungen im Einschaltmoment.

Know-how: Immer im gleichen Abstand

Damit unser Geradeausempfänger auf 455 kHz auch alle Sender empfangen kann, muß gleichzeitig mit dem Vorkreis (dem Antennenkreis) die Frequenz des Oszillators verändert werden. Dazu sitzen die beiden Plattenpakete des Drehkos auf einer Achse. Die Differenz der Frequenzen (LO minus RF) muß immer gleich bleiben. So wie bei einer Uhr für zwei Zeitzonen sich die Zeiger immer synchron drehen, aber zu jedem Zeitmoment einen Unterschied von einer Stunde aufweisen (Bild 232).

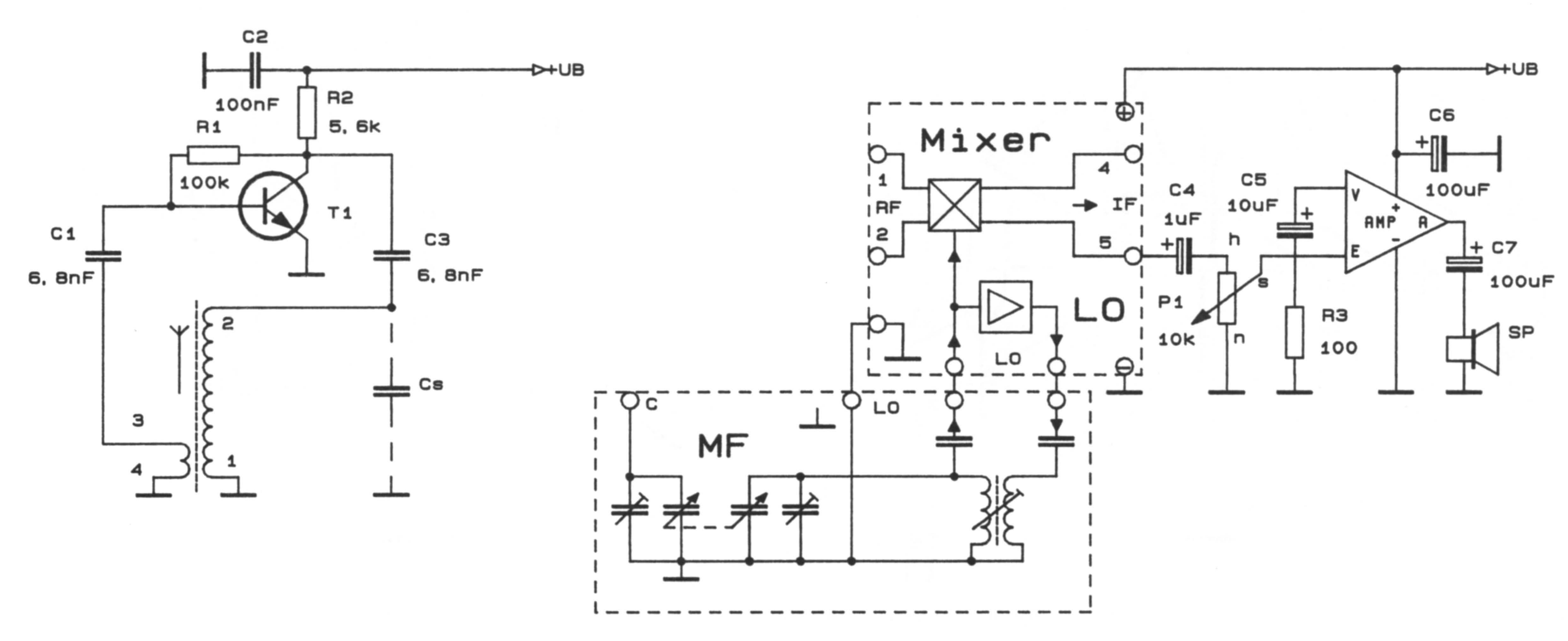


Bild 231. Ein Metallsuchgerät. Das Feld der Ferritantenne greift weit in den Raum hinein. Wenn das Feld durch metallische Gegenstände gestört wird, wird der Schwingkreis verstimmt. Die Frequenzänderung ist im Empfänger durch eine Tonhöhenänderung wahrzunehmen.

heutigen starken Belegung der Empfangsbänder ist die Verminderung der Lautstärke bereits in den Vorstufen sehr wichtig.

Zweierlei Gleiches

Wir entfernen den 100-nF-Kondensator C4 vom Anschluß 4 des Mixers und schließen ihn stattdessen am Ausgang 5 an. Es hat sich nichts Nennenswertes geändert. Beide Ausgänge sind offenbar gleichwertig. Würde man beide IF-Ausgänge gleichzeitig anschließen, wäre nichts mehr zu hören! Der Grund dafür ist, daß die beiden Signale 180 Grad Phasenverschiebung haben und sich deshalb beim Zusammenschalten auslöschen. Damit wir später unseren Super einfach abstimmen können, suchen wir uns jetzt einen Sender etwa in der Mitte des Abstimmbereiches, stellen ihn scharf ein und verändern dann bitte nicht mehr die Einstellung des Drehkos.

Auslöschung

Wir nehmen das LC-Modul zur Hand und drehen den Kern etwa 1 bis 1 1/2 Umdrehungen weiter hinein. Dadurch wird die Resonanzfrequenz des LC-Moduls auf etwa 450 bis 460 kHz eingestellt. Wir entfernen C4 und stecken stattdessen das LC-Modul ein: Bild 237 zeigt den kompletten Aufbau und Bild 236 die Schaltung dazu. Das LC-Modul wirkt jetzt wie ein Übertrager. Aber da die beiden Anschlüsse 4 und 6 jeweils im Gegentakt vom Mixer 'angestoßen" werden, hebt sich das Signal auf, und unser gerade noch empfangener Sender ist verschwunden. Wenn wir die Lautstärke stark aufdrehen, dürfte er in den meisten Fällen wieder schwach zu hören sein. Dies rührt von den unvermeidlichen Unsymmetrien her, die keine vollständige Auslöschung zulassen.

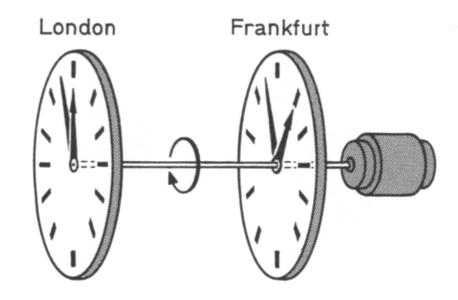


Bild 232. Damit sich eine konstante Zwischenfrequenz bildet, müssen der Antennenschwingkreis und der LO-Schwingkreis immer synchron abgestimmt werden. Die Differenz der beiden Resonanzfrequenzen muß immer die Zwischenfrequenz ergeben – so wie auch die Uhrzeitdifferenz zwischen Frankfurt und London immer genau eine Stunde beträgt.

Bild 233. Ein Geradeausempfänger mit Differenzverstärker. Die Drahtbrücke X verhindert das Anschwingen des Lokaloszillators (LO).

Super!!!

Jetzt kommt der spannende Moment. Unser Empfänger wird zum Superhet. Wir entfernen in Aufbau 237 die Drahtbrücke X, die den Anschluß 6 mit Masse verbindet. Dadurch schwingt der Oszillator an. Nun wird vorsichtig mit einem Schraubendreher der Kern der Spule auf dem MF-Modul so lange nach oben oder unten gedreht, bis der gleiche Sender wieder hörbar wird. Wenn sich auch Oszillator- und Eingangssignal im IF-(ZF-)Filter (das LC-Modul) gegenseitig auslöschen, das Mischprodukt kommt durch. Da das LC-Modul auf etwa 455 kHz abgestimmt ist, läßt es nur Signale mit dieser Frequenz durch. Alle Sender müssen mit Hilfe des LO auf diese Frequenz umgesetzt werden. Unser Super ist also eigentlich nichts anderes als ein Geradeausempfänger für 455 kHz, dem ein Frequenzumsetzer vorgesetzt ist (Diagramm 238). Die Lautstärke muß leider jetzt um einiges höher eingestellt werden. Der Geradeausempfänger brachte mehr Lautstärke. Aber, und das ist die Verbesserung, die Sender sind viel besser voneinander zu trennen. Wir werden vor allem auch mehr Sender hören als vorher, denn dort, wo vorher schwache Sender zu hören gewesen wären, wurden sie von den starken überdeckt. Der Super kann sie sauber voneinander trennen.

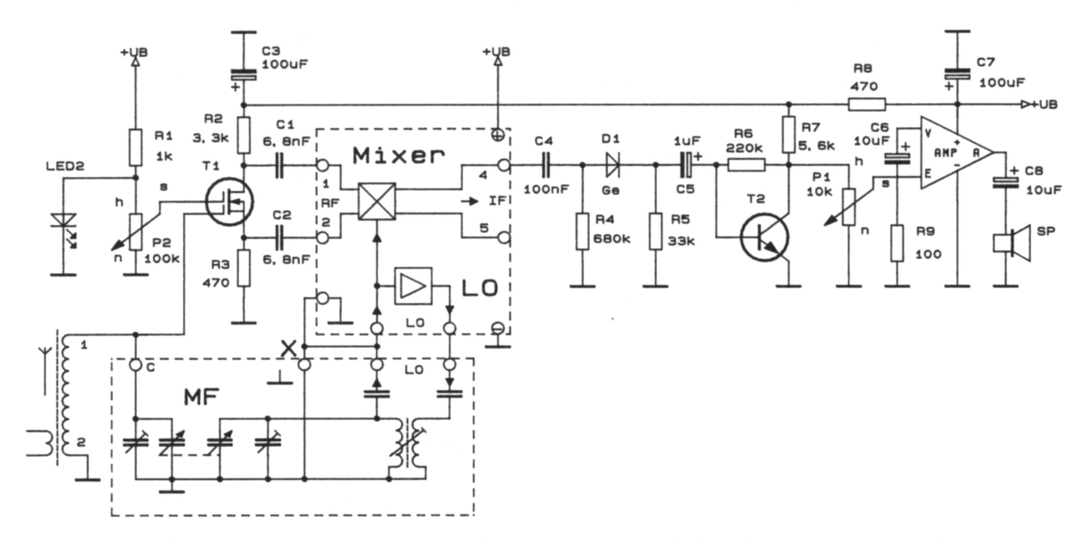


Bild 234. Elektronische Verstärkungseinstellung: Die Spannung an Gate2 des MOSFET (veränderbar durch P2) bestimmt die Verstärkung.

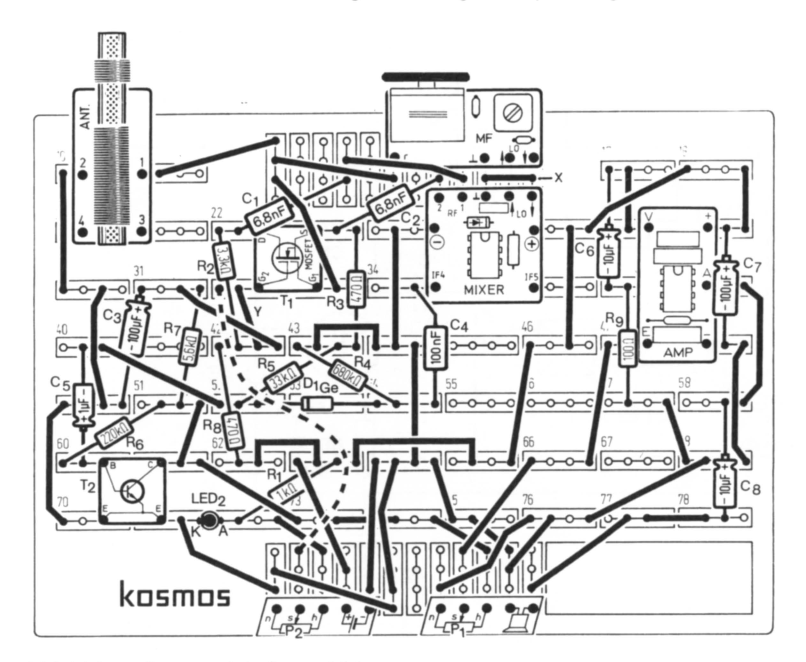


Bild 235. Aufbau zu Schaltung 234.

Zwischenfrequenzverstärker

Wie wir von den Rückkopplungsversuchen wissen, kann ein Verstärker leicht zum Oszillator werden, wenn der Eingang den Ausgang „sieht". Die Gefahr der unerwünschten Schwingungserzeugung ist umso größer, je größer die Verstärkung ist. Oft genügen schon die Anschlußdrähte der Bauteile als "Antennen". Deshalb ist es günstig, die Gesamtverstärkung auf Verstärkerstufen mit möglichst verschiedenen Arbeitsfrequenzen aufzuteilen. In der Schaltung nach Bild 239 verwenden wir T2 als IF-(ZF-)Verstärker. Dabei bleibt die Gesamtverstärkung zwar weitgehend gleich, aber die Schwellenspannung der Diode spielt jetzt nicht mehr die große Rolle. So können auch schwächere Sender gehört werden.

Optimierung

Leider funktioniert die synchrone Abstimmung der beiden Frequenzen nicht immer tadellos. Deshalb ist jedem Plattenpaket des Drehkos noch ein kleiner veränderlicher Kondensator – ein

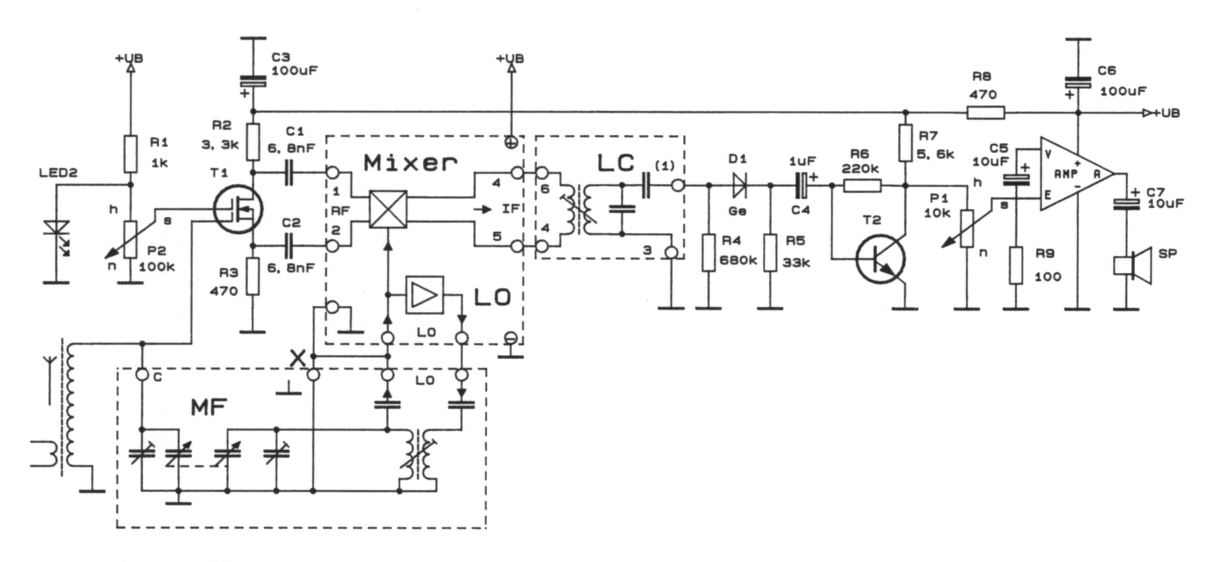


Bild 236. Das Ausgangssignal eines Differenzverstärkers wird bei symmetrischer Auskopplung (hier mit dem LC-Modul) ausgelöscht.

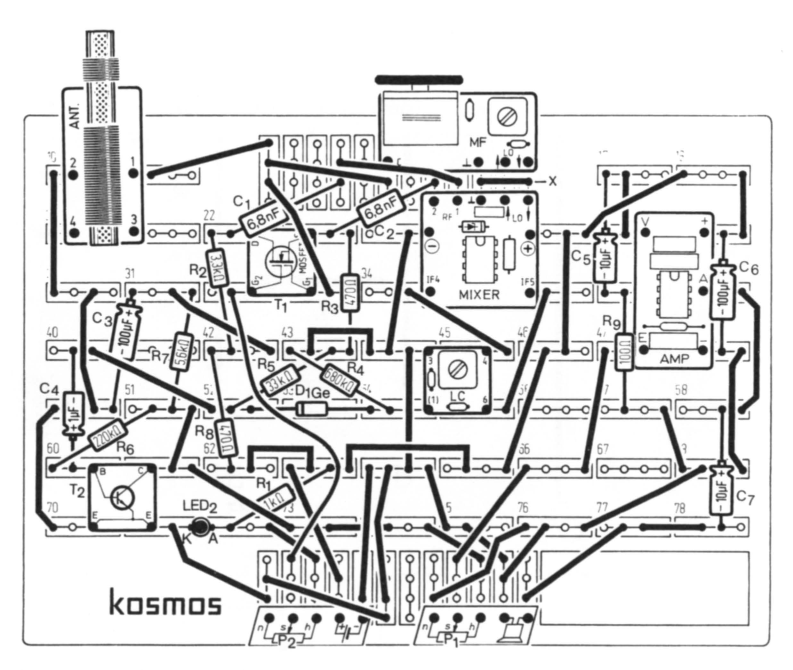


Bild 237. Aufbau zu Schaltung 236.

Trimmkondensator – parallelgeschaltet (Trimmer siehe Bild 181). Der obere bedient den LO-Kreis, der untere den Antennenkreis. Erfahrungsgemäß ist die günstigste Einstellung dann gegeben, wenn beide Trimmkondensatoren ganz herausgedreht sind. Wir können aber den Gleichlauf auch für ganz bestimmte Sender, die z.B. nur recht schwach einfallen, optimieren. Dazu beginnt man am besten mit dem unteren Trimmer, also dem Antennenkreis, indem man vorsichtig auf größte Lautstärke einstellt. Es kann dann notwendig sein, den oberen (LO-Kreis) geringfügig nachzustellen.

Spiel mit Zwischenfrequenz und LO

Obwohl bestimmte Frequenzen als Zwischenfrequenzen international genormt sind (455 kHz für die AM-Bereiche, 10,7 MHz für FM), so ist es doch prinzipiell gleichgültig, wo man die Zwischenfrequenz hinlegt. Es muß lediglich gewährleistet sein, daß die LO-Frequenz um den Betrag der IF(ZF) höher ist als die Empfangsfrequenz. Ja, es geht sogar auch anders herum: Um den Betrag der IF(ZF) kann die LO-Frequenz niedriger als die Ein-

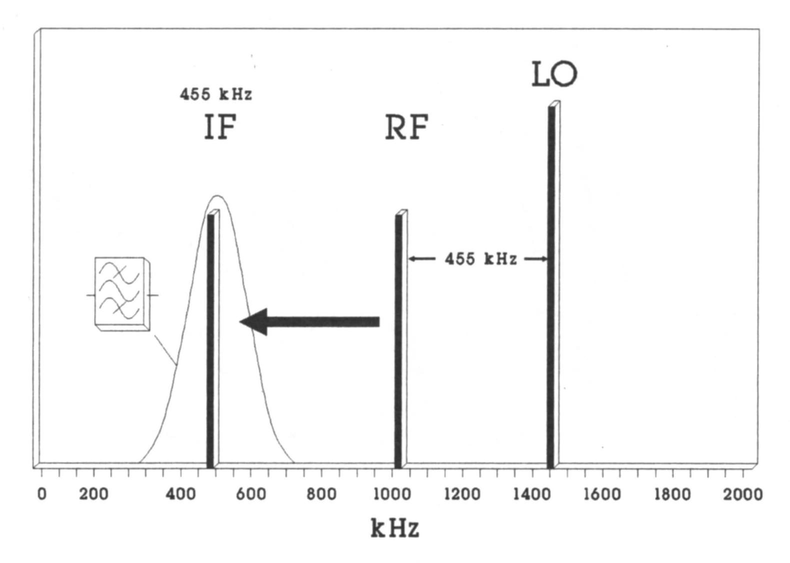


Bild 238. Wenn der Lokaloszillator (LO) 455 kHz oberhalb des Empfangssignals (RF) schwingt, entsteht als Differenzfrequenz eine Zwischenfrequenz von 455 kHz, die vom Zwischenfrequenzfilter herausgesiebt und dem Demodulator zugeführt wird.

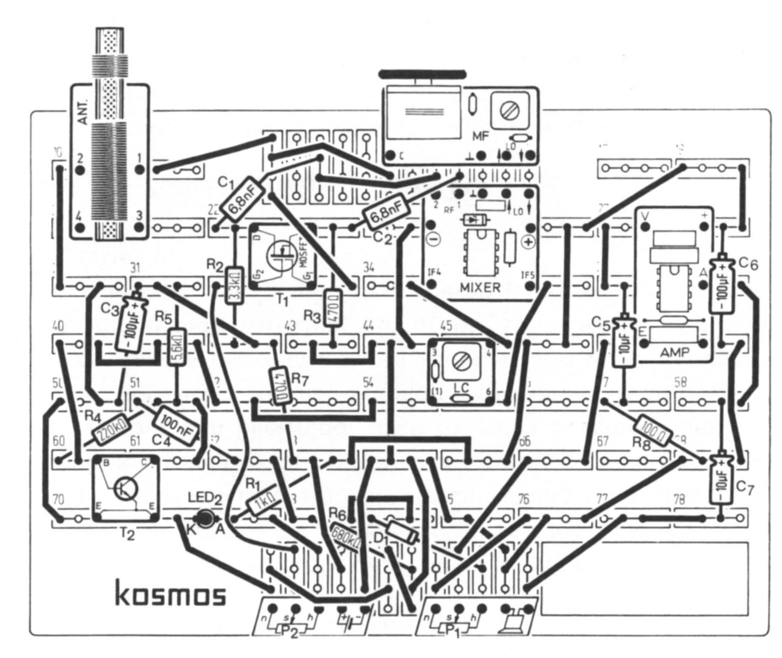


Bild 240. Aufbau zu Schaltung 239.

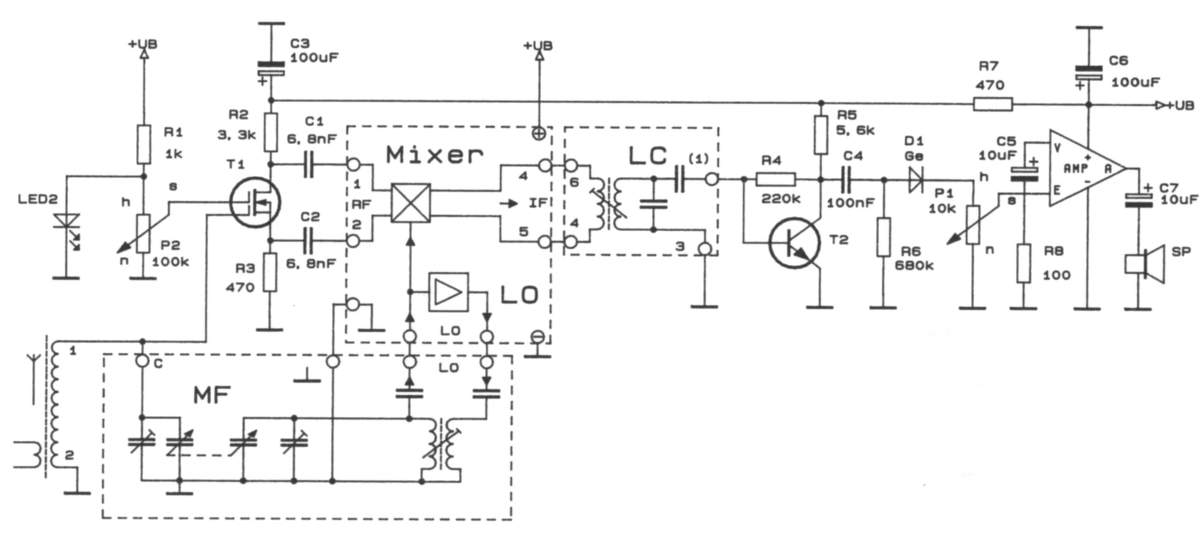


Bild 239. Ein Mittelwellensuper mit Zwischenfrequenzverstärker.

Know-how: Spieglein, Spieglein im Band

Beispiel: Der Mittelwellenbereich reicht von 526,5 bis 1606,5 kHz. Angenommen, wir empfangen einen Sender bei 1500 kHz und haben durch Drehen am LC-Modul die Zwischenfrequenz auf 400 kHz erniedrigt. Dann müßten wir mit Hilfe der Spule auf dem MF-Modul eine LO-Frequenz von 1900 kHz einstellen (Bild 241). Wenn der Antennenkreis mit

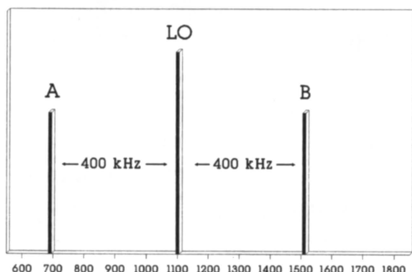


Bild 241. Zu jeder LO-Frequenz gibt es immer zwei Empfangsfrequenzen, die, gemischt mit der LO-Frequenz, dieselbe Zwischenfrequenz bilden. Es ist die Aufgabe des Antennenkreises, diesen Spiegelempfang zu verhindern. Deshalb darf die Zwischenfrequenz nicht zu niedrig sein.

gangsfrequenz sein. Wir stellen einen Sender etwa in der Mitte des Empfangsbereiches scharf ein und drehen den Kern des LC-Moduls ganz heraus; dadurch verschieben wir die Zwischenfrequenz nach oben, zu höheren Frequenzen hin. Sofort wird der eingestellte Sender leiser, vielleicht verschwindet er sogar ganz. Damit diese Sendefrequenz durch das IF-(ZF-)Filter paßt, müssen wir die LO-Frequenz ebenfalls nach oben schieben, d.h. den Kern links herum herausdrehen, bis wieder die maximale Lautstärke erreicht ist. Die höhere Zwischenfrequenz verlangt natürlich auch einen größeren Abstand des LOs zur Empfangsfrequenz.

Tiefe Zwischenfrequenz: Gefahr von Spiegelempfang

Wir machen die Zwischenfrequenz kleiner, indem wir den Kern des LC-Moduls rechts herum hineindrehen. Um wieder den Sender gut zu empfangen, muß auch der Kern der LO-Spule auf dem MF-Modul weiter hineingedreht werden. Wir prüfen jetzt den gesamten Empfangsbereich, indem wir den Drehko ganz durchdrehen. Jetzt kann es passieren, daß wir einen Sender vom oberen Ende der Skala nochmal an dem unteren Ende hören. Dies ist aber kein echter Empfang, es ist das frequenzmäßige Spiegelbild des Senders.

Abendstunden bringen Fernempfang

So wie Kurzwellen können auch Mittelwellen an der Ionosphäre reflektiert werden und große Entfernungen überbrücken. Die Wahrscheinlichkeit für eine Reflexion an der Ionosphäre ist in den Abend- und Nachtstunden am größten. Da die Sonne dann auf der anderen Seite der Erdkugel steht, nimmt die Elektronenkonzentration in der Ionosphäre ab und erreicht die für Mittelwellenreflexion kritischen Werte. An einem einzigen Abend kann man dann ausgedehnte Fernreisen unternehmen, ohne den heimischen Herd verlassen zu müssen. Mit Einbruch der Dunkelheit können dann oft immer mehr ausländische Stationen empfangen werden.

Lose Kopplung wird mit starken Sendern fertig

Gerade in den Abendstunden, wenn viele Sender mit großer Feldstärke einfallen, sind auch viele Pfeifstellen und Scheinsender zu hören. Leider mischt sich jeder Sender nicht nur mit der LO-Frequenz zu einer einzigen Zwischenfrequenz, nein, infolge der unvermeidlichen Nichtlinearitäten der Bauteile entstehen sowohl aus den Frequenzen der empfangenen Sender als auch aus der Frequenz des Lokaloszillators Oberwellen. Und alle diese verschiedenen Frequenzen mischen sich munter miteinander, so daß auch einige Mischprodukte wiederum in die IF(ZF) fallen. Abhilfe bringt zum einen das Zurückdrehen der RF-(HF-)Lautstärke, aber wesentlich wirksamer ist eine lose Kopplung des Antennenkreises, da dieser dann deutlich selektiver wird (Bild 242). Wir schalten G1 des MOSFETs an den Anschluß 3, also an die kleine Wicklung der Ferritantenne (Bild 244). Sofort werden die Lautstärken der empfangenen Sender wesentlich geringer. Aber aufgrund der geringeren Störungen können dann schwache Sender trotzdem besser hörbar sein.

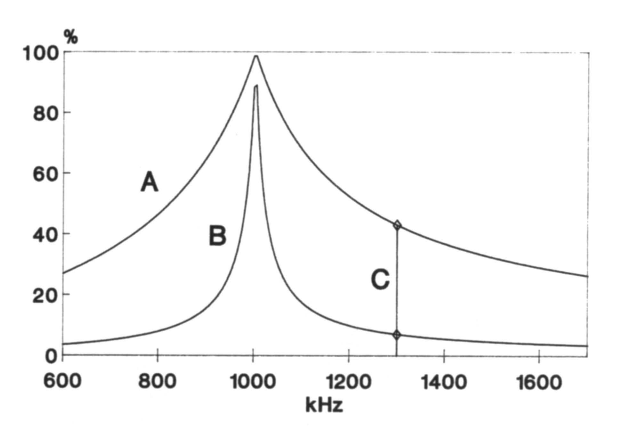


Bild 242. Die Abstimmkurven eines zu fest (A) und eines lose angekoppelten Schwingkreises (B). Ein Störsender bei 1300 kHz (C) erscheint immerhin noch etwa halb so laut wie der „richtige" auf 1000 kHz eingestellte Sender. Bei einem trennscharfen Schwingkreis erscheint er dagegen nur mit etwa 10 %. Lose Kopplung ist also immer vorzuziehen.

Hilfe des Drehkos auf 700 kHz eingestellt wird, beträgt die LO-Frequenz 1100 kHz. Sie liegt dann aber genau 400 kHz (das ist unsere Zwischenfrequenz) unterhalb des vorher bei 1500 kHz empfangenen Senders. Zwar ist der Antennenkreis dann nicht in Resonanz, aber wir wissen ja, daß ein starker Sender auch dann durchschlagen kann, und unser Super mischt den Spiegeldurchschlag auf die Zwischenfrequenz. Deshalb ist eine hohe Zwischenfrequenz aus Gründen des Spiegelempfangs immer vorzuziehen.

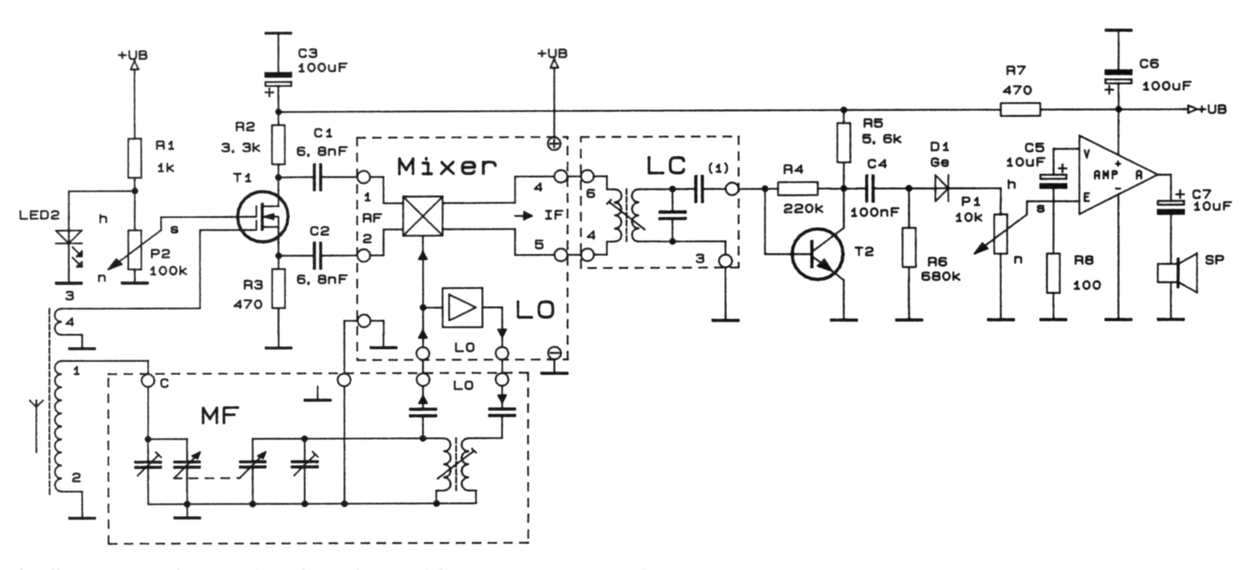


Bild 243. Ein Mittelwellensuper mit loser Ankopplung der Hochfrequenzverstärkerstufe (T 1). Diese Schaltung ist besonders in den Abendstunden zu empfehlen, wenn viele starke Sender einfallen.

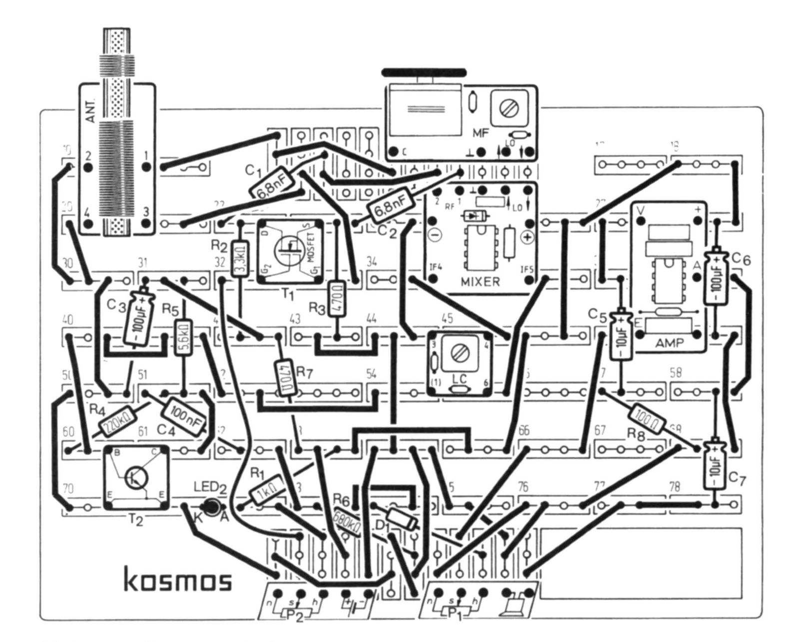


Bild 244. Aufbau zu Schaltung 243.

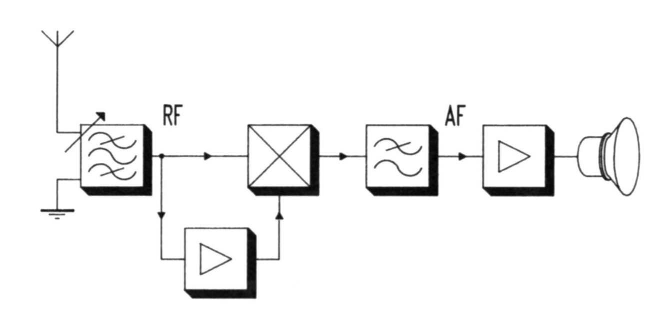


Bild 245. Das Blockschaltbild eines Synchron-Gleichrichters. Synchron-Gleichrichtung entspricht einer Mischung mit sich selbst.

Know-how: Wobbelsender

Zum Prüfen von Schwingkreisen und Filtern, sowie ganz allgemein zum Messen der Frequenzgänge von Verstärkern eignet sich ein Wobbelsender besonders gut. Ein Wobbelsender „fährt" den gesamten zu untersuchenden Frequenzbereich durch, um am Ende wieder blitzschnell zu seiner Anfangsfrequenz zurückzuspringen und dann erneut mit einem Durchlauf zu beginnen. Die Ausgangsspannung der zu untersuchenden Schaltung kann dann mit einem Oszilloskop über der Frequenzachse betrachtet werden. Wenn die Frequenzänderung schnell genug erfolgt, ergibt sich so ein stehendes Bild von z.B. der Filterkurve auf dem Bildschirm.

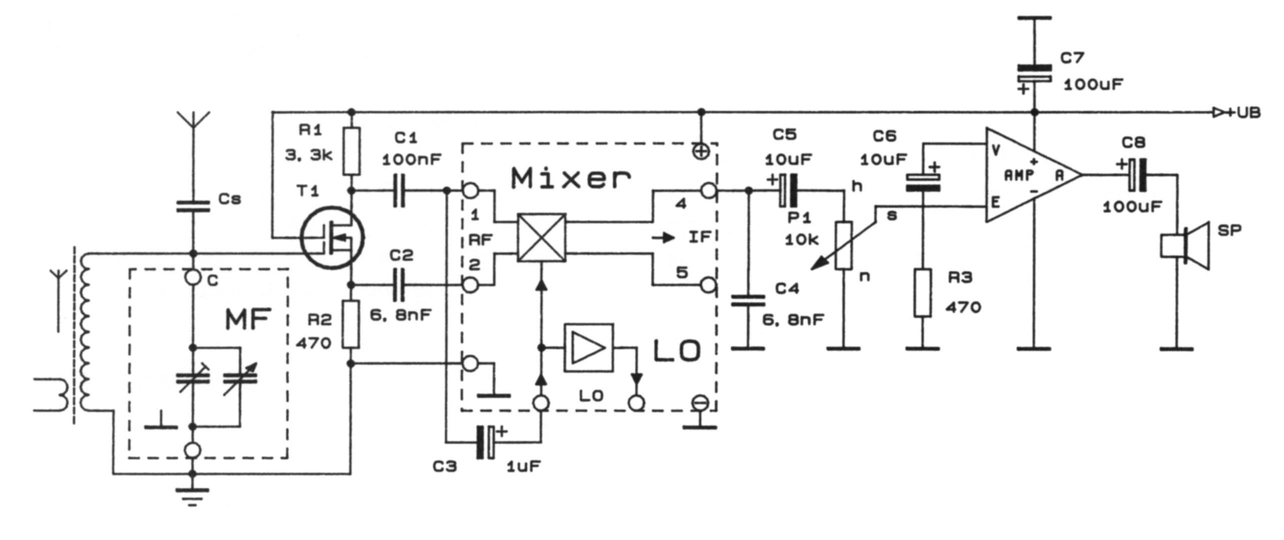


Bild 246. Schaltung eines AM-Synchron-Gleichrichters.

AM-Synchrongleichrichter

Auch ein Schalter kann gleichrichten, wenn man z.B. dafür sorgt, daß er immer nur bei den positiven Halbwellen geschlossen und bei den negativen geöffnet ist. Als Schalter dient in bewährter Weise das Mixermodul (Bild 245). Es bekommt sowohl an den RF-Eingängen als auch am LO-Eingang dasselbe Signal, nämlich die AM-Rundfunkfrequenzen angeboten. Dann sortiert es automatisch die Halbwellen und gibt an Anschluß 4 die positiven und an Anschluß 5 nur die negativen heraus (Bild 247). Wir entscheiden uns für einen (welcher ist im Grunde egal) und führen das so demodulierte Signal dem AF-(NF-)Verstärker zu (Schaltbild 246, Aufbau 248).

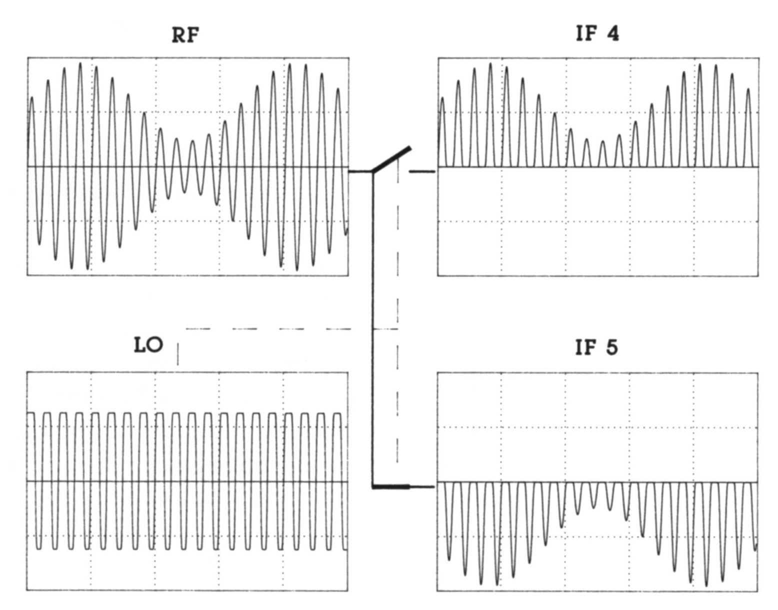


Bild 247. Ein Synchron-Gleichrichter sortiert positive und negative Amplituden, indem er immer nur dann durchschaltet, wenn die gewünschte Amplitude „vor der Tür steht".



Know-how: Hexenwerk – Bauteile auf hohen Frequenzen

Unser VHF-Modul gibt uns einen Eindruck von den praktischen Schwierigkeiten im UKW-Bereich: Die Spulen reduzieren sich auf wenige Windungen, die Kapazität eines Drahtes oder gar einer Steckfeder ist nicht mehr zu vernachlässigen, alle Leitungen, die „heiß" sind, müssen sorgfältig von anderen Leitungen abgeschirmt werden, denn sie wirken bereits als Antennen. Dazu dienen sogenannte Schirmleitungen, also kupferne Masseflächen. Schlimmer noch: Bereits die Kapazität zwischen den einzelnen Windungen einer Spule macht sich bemerkbar. Hier auf den hohen Frequenzen wird das Wort von der Hochfrequenz als Hexenwerk erst so richtig faßbar. Es kann sogar so weit gehen, daß die Windungskapazität einer Spule stärker wirkt als ihre Induktivität selbst. Dagegen kann die Induktivität des Anschlußdrahtes eines Kondensators bereits bewirken, daß

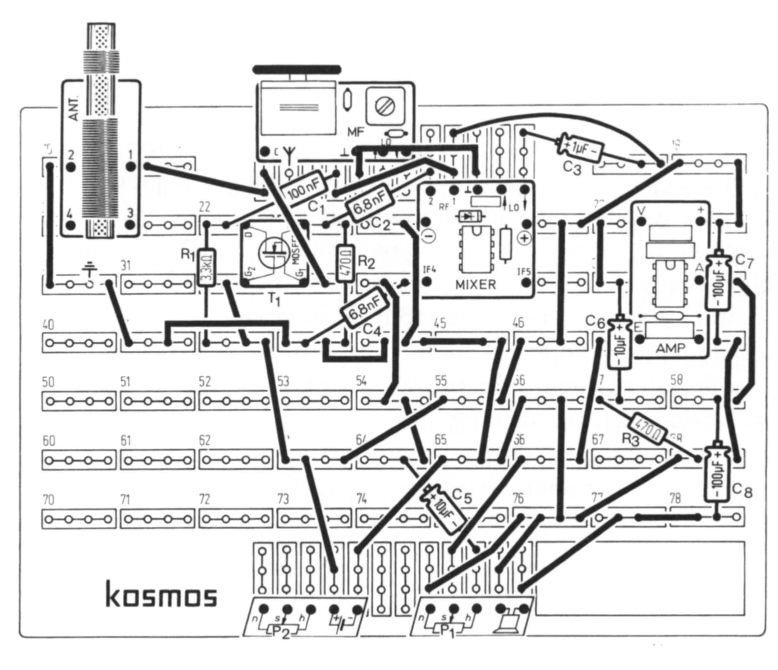


Bild 248. Aufbau zu Schaltung 246.

8. UKW- und FM-Technik

Jeder Rundfunksender möchte natürlich in einem großen Umkreis gehört werden. Niemand hielt es deshalb ursprünglich für sinnvoll, ausgerechnet auf den ultrakurzen Wellen, die ja bekanntlich hinter dem Horizont die Erdoberfläche verlassen und im Weltall auf Nimmerwiedersehen verschwinden, für Rundfunkzwecke zu benutzen. Eigentlich begann alles als eine Verlegenheitslösung: Nach dem zweiten Weltkrieg durften die deutschen Mittelwellensender nur mit relativ geringer Leistung und nur noch auf wenigen Frequenzen arbeiten. Diese Auflagen waren kaum geeignet für den Aufbau eines flächendeckenden Rundfunknetzes mit mehreren Programmen. Der „unbrauchbare" UKW-Bereich dagegen lag mit seiner schier unglaublichen Frequenzfülle einfach brach.

In unserem heutigen 20 MHz breiten UKW-Rundfunkbereich hätten bis zu 2000 herkömmliche AM-Sender Platz. Der damalige Nordwestdeutsche Rundfunk (NWDR) wollte am 1. März 1949 als erster UKW-Rundfunksender der Welt „in die Luft gehen". Zu diesem Zweck wurde von der Firma Telefunken ein 100 W starker Sender für die Frequenz von 88,9 MHz gebaut. Aber die „Nordlichter" hatten die Rechnung ohne die Bayern gemacht. Am Tag zuvor nämlich sendete man aus München; die Firma Rohde & Schwarz hatte in fieberhafter Eile einen Versuchssender zum Rundfunksender umgebaut.

Mit schwachen Sendern zum Erfolg

Natürlich waren diese ersten UKW-Sender nur in unmittelbarer Nähe des Senderstandortes zu empfangen. Während Mittel- und Langwellensender meist in der Ebene stehen, müssen UKW-Sender unbedingt auf möglichst hohen Bergen aufgebaut werden, denn umso größer ist dann ihre Reichweite. Dies genügt aber für eine herkömmliche Rundfunkversorgung keineswegs. Irgendwo verschwindet ein Sender immer hinter dem „Radiohorizont." Aber was liegt näher, als dieses Funkloch wiederum mit einem Sender zu füllen und ihn das gleiche Programm abstrahlen zu lassen. Für eine flächendeckende Versorgung benötigt man jetzt also wesentlich mehr Sender. Aber da es nicht nötig ist, daß auch die Marsmännchen unser Rundfunkprogramm empfangen, genügen Sender mit einer wesentlich geringeren Sendeleistung. Hinzu kommt noch, daß die Antennen bei 3 m Wellenlänge wesentlich handlichere Abmessungen besitzen und deshalb viele kleine Antennen an einem einzigen Mast angebracht werden können. Auch kann in geziemendem Abstand wiederum ein anderer Sender dieselbe Frequenz benutzen, ohne zu stören.

die RF(HF) gar nicht bis zum Kondensator vordringt (Bild 249).

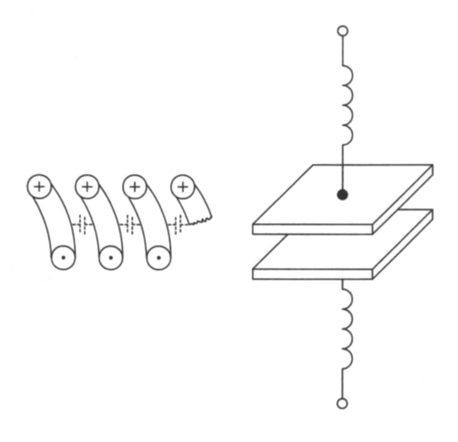


Bild 249. Auf den hohen Frequenzen können die Kapazität zwischen den Windungen einer Spule und die Induktivität der Anschlußdrähte eines Kondensators sehr stören.

Die verführerische Weite des Frequenzspektrums

„Platz" hatte man im UKW-Bereich wirklich genug. Was lag näher, als ihn zur Verbesserung der Klangqualität zu benutzen. Herkömmliche AM-Rundfunksender können zwar Sprache ganz brauchbar übertragen, aber die Musik klingt doch reichlich gequält. Funker sprechen von Nasenklammermodulation (hört sich an, als ob einer mit einer Wäscheklammer auf der Nase spricht). Normalerweise können wir Töne bis etwa 15...16 kHz noch gut hören. Ein AM-Sender überträgt aber nur maximal 4,5 kHz. In dem fehlenden Bereich liegen hauptsächlich die Obertöne der Instrumente. Also, so die richtige Entscheidung der UKW-Pioniere: 15 kHz müssen mindestens übertragen werden. Nach den Regeln der AM würden dann aber immer noch 666 Sender mit je 30 kHz Bandbreite in den UKW-Bereich passen und alle in demselben Gebiet!

Störungen sitzen auf der Amplitude

Sicher habt Ihr bei unseren AM-Versuchen schon mehrfach Störungen gehört. Das Knattern der Zündfunken eines schlecht entstörten Benzinmotors (z.B. Nachbars Rasenmäher), das helle Sirren eines Elektromotors in einem Haushaltsgerät (z.B. einem Mixer oder einem Haartrockner) oder der peitschende Schlag eines Blitzes. Wie es sich schon Heinrich Hertz zunutze machte: Alle elektrisch erzeugten Funken senden hochfrequente Wellen aus! Ein AM-Empfänger kann natürlich nicht unterscheiden, ob diese Amplitudenschwankung zur Modulation gehört oder ob sie durch einen Störer verursacht wurde. Also, so die logische Schlußfolgerung, AM ist out, wir brauchen ein neues Verfahren! Um einer elektromagnetischen Welle einen Nachrichteninhalt aufzuprägen, muß dies nicht unbedingt bei der Amplitude geschehen. Man kann auch ihre Frequenz verändern. Und so benutzen alle UKW-Rundfunksender Frequenzmodulation (FM) (Bilder 250 und 251).

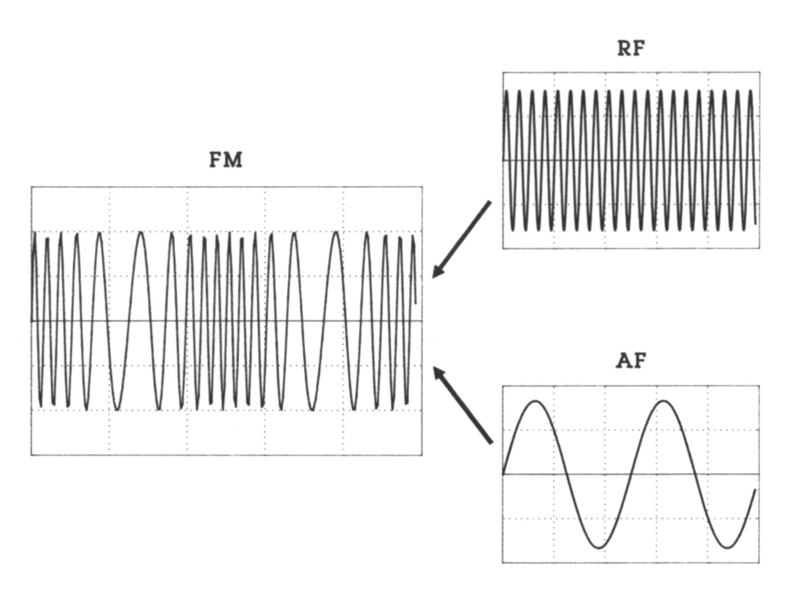


Bild 250. Wenn die Niederfrequenz (AF) die Hochfrequenz (RF) in ihrer Frequenz verändert, entsteht Frequenzmodulation (FM).

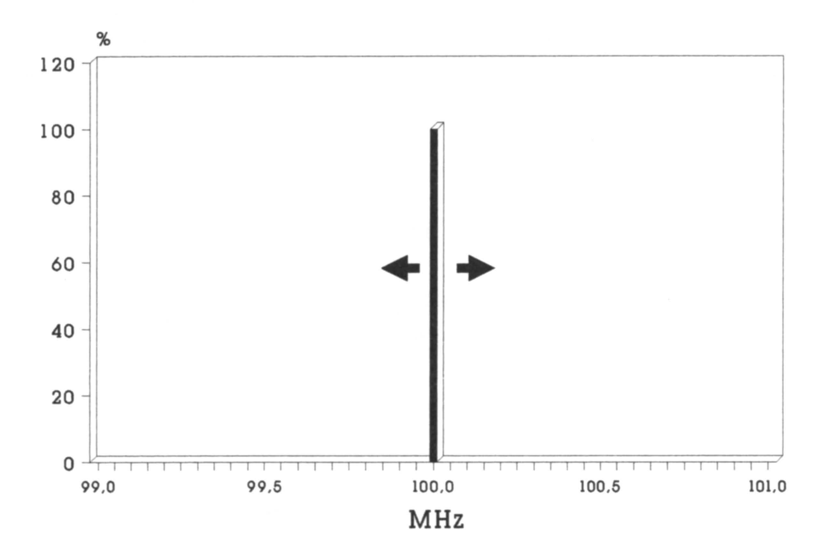


Bild 251. Bei der FM wird die Trägerfrequenz durch die Modulation hin- und hergezerrt.



Know-how: Kapazitätsdiode – ein elektronischer Drehko

Die Sperrschicht einer Diode, die in Sperrichtung gepolt ist, verarmt an Ladungsträgern. Dadurch wird der Abstand der Ladungsträger immer größer (Bild 252).

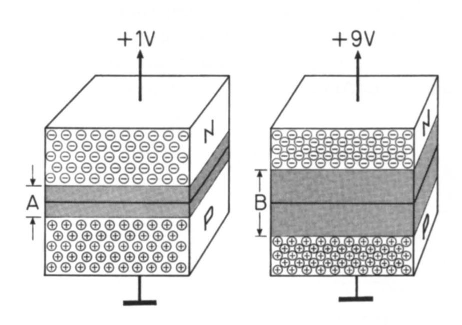


Bild 252. So funktioniert eine Kapazitätsdiode: Bei niedriger Sperrspannung ist die Sperrschichtzone schmal und ihre Kapazität entsprechend groß. Bei hoher Spannung verbreitert sich die Sperrschichtzone und verringert die Kapazität.

Man kann den Zustand der Diode also wie folgt beschreiben: Zwei leitende Schichten, die von einer isolierenden Schicht getrennt sind. Das aber hört sich doch sehr nach dem Steckbrief eines Kondensators

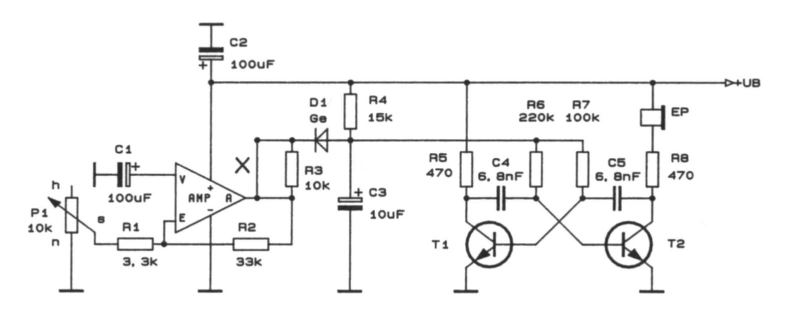


Bild 253. Ein jaulender Multivibrator. Wenn die Drahtbrücke X entfernt wird, entsteht ein Wobbelgenerator.

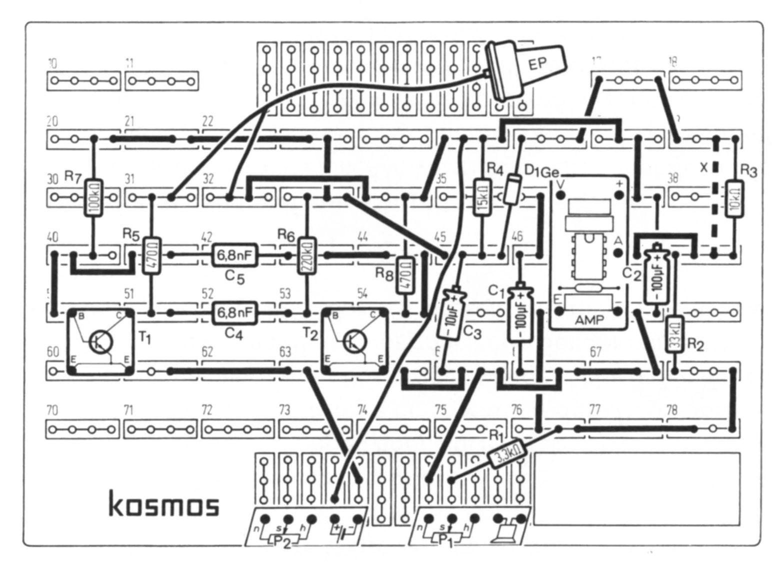


Bild 254. Aufbau zu Schaltung 253.

Experimente

Sweep – Quer durch alle Frequenzen

Um uns gründlich in die FM-Technik einzuarbeiten, steigen wir wiederum in die Niederungen der Gleichstromelektronik hinab (Bild 254). Wir benutzen zwei gewöhnliche Multivibratoren. Der rechte in Bild 253, der einen Ton erzeugt, wird klassisch aus Einzeltransistoren zusammengesetzt, der linke, der diesen Ton in der Frequenz moduliert, wird mit Hilfe unseres AMP-Moduls aufgebaut. Die Drahtbrücke X wird zunächst noch nicht eingesteckt. Je nach dem, in welcher Stellung sich Poti P1 befindet, wird der Ton im Hörer schnell oder langsam in seiner Frequenz verändert. P1 bestimmt also die Höhe der Modulationsfrequenz. Der rechte Multivibrator erzeugt dagegen die Trägerfrequenz.

Wobbelsender

Wir stecken die Drahtbrücke X ein. Wenn der Ausgang des linken Multivibrators auf eine niedrige Spannung geht, wird der Kondensator C3 über die Diode Ge schnell entladen. Die Frequenz des rechten Multivibrators fällt dadurch rapide auf ihren niedrigsten Wert. Geht der Ausgang des linken Multivibrators dagegen auf Plusspannung, sperrt die Diode Ge, und C3 kann sich langsam über R4 aufladen. Durch die langsam steigende Spannung wird die Frequenz des rechten Multivibrators dann zu höheren Frequenzen hin verändert.

FM – Sprache läßt Multivibrator jaulen

Wir bauen einen Mikrofonverstärker mit dem AMP-Modul. Mit der Ausgangsspannung wird nun die Frequenz eines Multivibrators gesteuert (Bild 256). Wenn wir in das Mikrofon (den Lautsprecher) hineinpfeifen, schnattert der Ton im Hörer. Wir versuchen eine tiefe und eine hohe Frequenz zu pfeifen. Entsprechend erfolgt die Frequenzänderung von MV 1 langsamer oder schneller. Die Sprache hört sich jetzt allerdings ein wenig seltsam im Hörer an.

FM-Sender

Natürlich macht es viel mehr Spaß, einen FM-Sender im Hochfrequenzbereich zu betreiben (Bild 257). Hierbei greifen wir auf bewährte Standardschaltungen zurück. Als Sender dient wieder

an. In der Tat. Eine in Sperrichtung gepolte Diode hat Kapazität! Zwar sind dies nur wenige pF, aber immerhin! Wie wir wissen, genügt das ja auf den höheren Frequenzen. Man hat spezielle Dioden „gezüchtet", deren Sperrschichtkapazität möglichst groß ist. Man nennt sie Kapazitäts-Variations-Dioden oder kurz Varicap. Je höher die an der Diode liegende Sperrspannung ist, desto weiter entfernen sich die Ladungsträger voneinander, desto geringer ist ihre Kapazität. Man kann also sehr einfach über die an der Diode liegende Spannung die Kapazität verändern. Auf dem VHF-Modul sind zwei solche elektronische Drehkos angeordnet. Sie sehen aus wie Transistoren im Plastikgehäuse. Jedes Gehäuse enthält jedoch zwei gegeneinander in Reihe geschaltete Kapazitätsdioden. Sie verhalten sich wie zwei hintereinander geschaltete Kondensatoren. Auf diese Weise ist es sehr einfach, die Abstimmspannung über einen Widerstand zuzuführen, wobei beide Dioden dann automatisch in Sperrichtung gepolt sind.

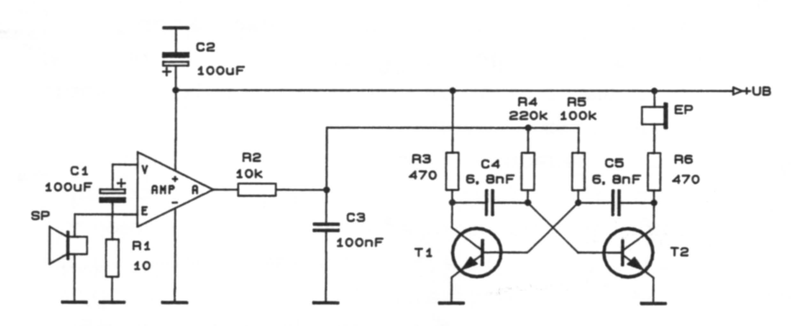


Bild 255. Ein frequenzmodulierter Multivibrator.

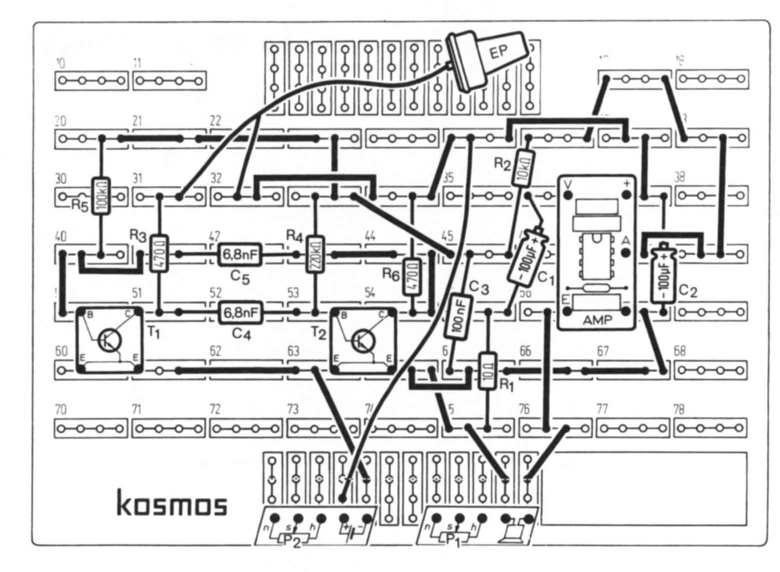


Bild 256. Aufbau zu Schaltung 255.

der Meißner-Oszillator, erweitert um den Frequenzmodulator, und als Empfänger benutzen wir das Mixermodul als Schwebungsempfänger, bekanntermaßen hervorragend zum Nachweis von Frequenzänderungen geeignet. Diesmal aber nur mit Kopfhörerempfang, da wir das AMP-Modul als Modulator brauchen. Eine Frequenz kann nur am Ort ihrer Entstehung geändert werden. Deswegen muß die Modulation am Oszillator selbst erfolgen. Wir nutzen dazu die Spannungsabhängigkeit der Transistorkapazitäten schamlos aus. Was vorher ein Dreckeffekt war, wird jetzt zur Tugend umgemünzt. Im Ruhezustand liegt die Ausgangsgleichspannung des AMP-Moduls etwa auf der Hälfte der Batteriespannung. Beim Sprechen in das Mikrofon schwankt diese Gleichspannung um ihre Ruhelage herum im Takt der Niederfrequenz. Dadurch wird der Arbeitspunkt des Oszillator-Transistors T 1 ständig verschoben. Die sich dadurch verändernden Transistorkapazitäten, die ja parallel zum Schwingkreis liegen, bewirken dann die Frequenzänderungen. Gegenüber alten Experimentierhasen muß sicherlich nicht extra erwähnt werden, daß durch Einstellung der Kerne in den Spulen zunächst annähernd Frequenzgleichheit hergestellt werden muß. Mit Hilfe des Drehkos wird möglichst genau auf Schwebungs-Null abgeglichen. In schon gewohnter Weise pfeifen wir in das Mikrofon mit hohen und tiefen Tönen bzw. sprechen hinein. Im Kopfhörer ist die Frequenzänderung des Überlagerungstones deutlich zu hören.

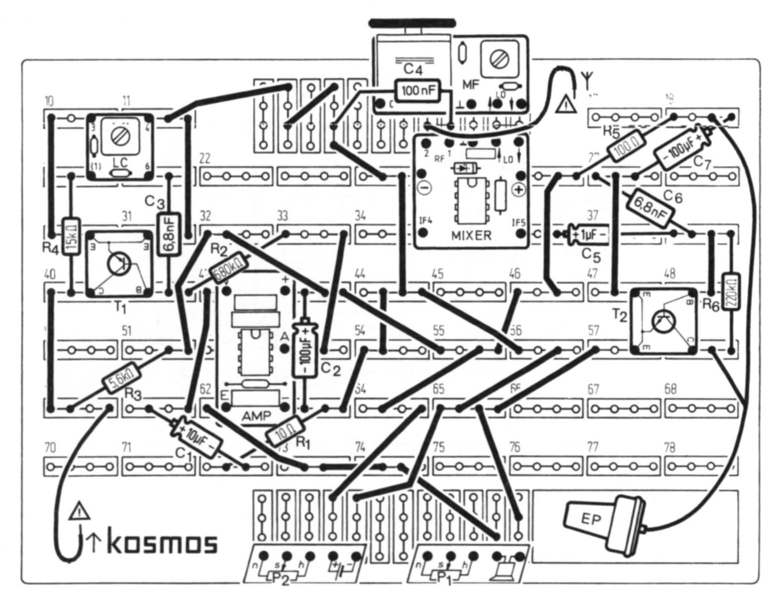


Bild 257. Aufbau zu Schaltung 258.



Know-how: Hin und her – Frequenzmodulation

Bei der Frequenzmodulation steckt die Lautstärke in dem sogenannten Frequenzhub. Das ist die maximale Abweichung der Momentanfrequenz von der Trägerfrequenz. Ein Sender klingt umso lauter, je größer der Frequenzhub ist. Die gesamte Bandbreite eines FM-Senders läßt sich mit folgender Faustformel berechnen:
Bandbreite = doppelter Frequenzhub + doppelte Modulationsfrequenz.
Beispiel: Der UKW-Rundfunk überträgt als höchste Modulationsfrequenz 15 kHz. Bei der größten Lautstärke darf der Sender nicht mehr als 75 kHz von der Trägerfrequenz entfernt werden. Er benötigt deshalb zur ungestörten Übertragung eine Bandbreite von
2 · 15 kHz + 2 · 75 kHz = 180 kHz. D.h., daß ein FM-Sender den gleichen Frequenzbereich wie 20 Sender des AM-Bereichs benötigt. Nicht ganz so verschwenderich gehen die in

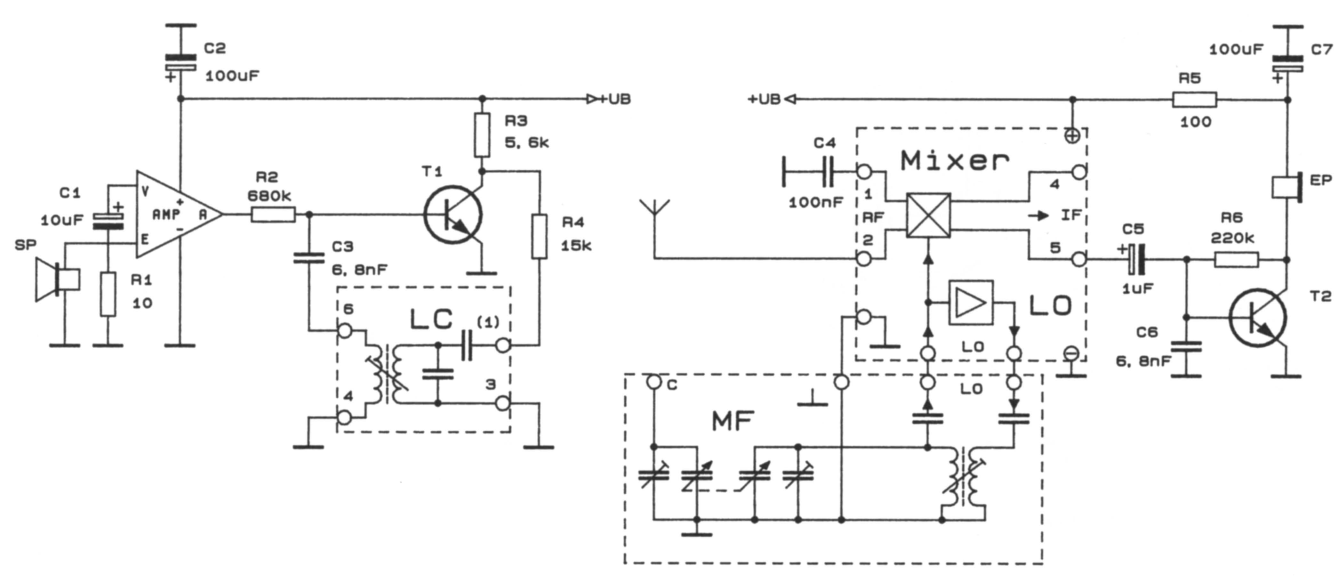


Bild 258. FM-Sender mit Direktmischempfänger zum Nachweis der Frequenzänderung.

Abgleich: Radio als Meßempfänger

Hier auf den höheren Frequenzen ist mit einem Geradeausempfänger kein Blumentopf mehr zu gewinnen. Der UKW-Empfänger, den wir bauen werden, wird ein Super sein. Als erstes stellen wir die Frequenz des späteren LO ein (Bild 261). Mit P2 wird der Oszillator abgestimmt: niedrige Spannung – niedrige Frequenz, hohe Spannung – hohe Frequenz. Wir stellen P2 etwa auf „2" und verwenden ein im Haushalt vorhandenes Radio mit UKW-Bereich als Meßempfänger und plazieren es unmittelbar neben unserer Steckplatte. Das Radio wird auf eine freie Stelle am oberen Rand der Skala (etwa 107 bis 108 MHz) eingestellt. Sollte dort gerade ein Sender zu empfangen sein, wird etwas darüber oder darunter abgestimmt. Jetzt drehen wir an der mit LO bezeichneten Spule mit einem kleinen Schraubendreher so lange den Kern in der Spule auf und ab, bis das Rauschen im UKW-Radio deutlich nachläßt und so die Anwesenheit eines Trägers anzeigt. Besonders bequem ist es, wenn das Radio eine Abstimmanzeige hat und wir auf größten Ausschlag einstellen können. Diese dann gefundene Einstellung der LO-Spule darf, um ein Gelingen der folgenden Versuche sicherzustellen, nicht mehr verändert werden.

UKW-FM-Sender

Wir erweitern die Schaltung um einen Modulationsverstärker mit dem Transistor T 1, wobei wir wieder den Lautsprecher als Mikrofon benutzen und stellen Poti P1 auf etwa „4...5" ein (Bild 263). Die Ausgangswechselspannung von T 1 wird der am Poti P2 eingestellten Gleichspannung überlagert. Das bedeutet, daß die frequenzbestimmende Spannung im Takt der Modulation schwankt. Das hat natürlich zur Folge, daß auch die Frequenz

Schmalband-Frequenzmodulation arbeitenden Funkgeräte von Polizei und Feuerwehr mit dem immer kostbarer werdenden Frequenzraum um: Sie übertragen nur Töne bis höchstens 3 kHz (Telefonqualität) mit einem maximalen Frequenzhub von 2,4 kHz.



Know-how: Flankendemodulation und Diskriminatoren

Der Weg zu einem richtigen FM-Radio führt zwangsläufig zu der Frage: Wie demoduliert man FM? Die einfachste Methode ist, sie in AM umzuwandeln und gleichzurichten. Damit haben wir die Frage aber nur verlagert. Wie wandelt man sie, bitteschön, in AM um? Wir stellen uns vor, daß wir einen Schwingkreis nicht genau auf einen Sender, sondern leicht daneben einstellen, z.B. geringfügig darunter. Wenn die Frequenzmodulation die Frequenz des Senders erhöht, wird dieser dann scheinbar besser abgestimmt sein und eine grö-

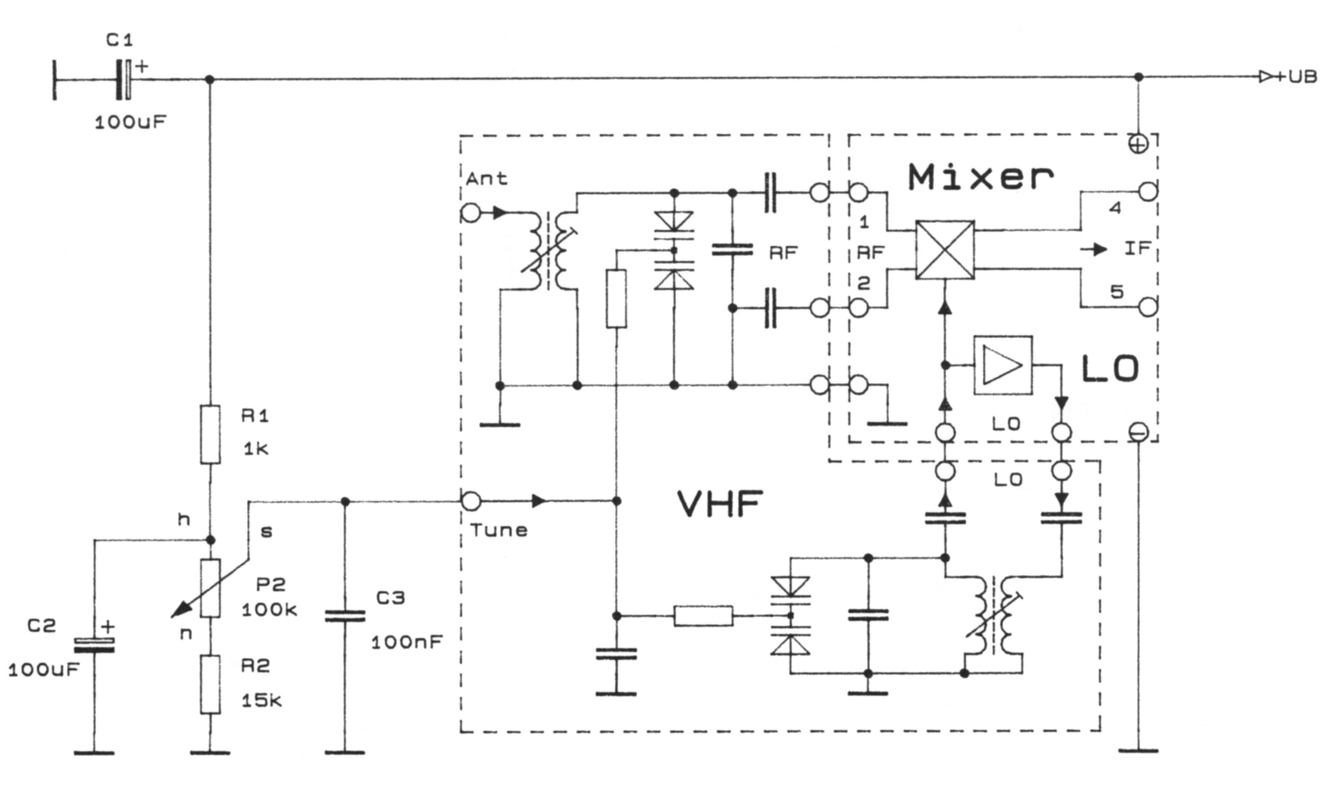


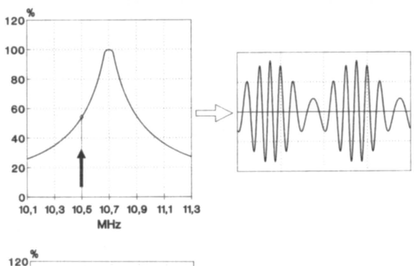
Bild 259. Wir nehmen den UKW-LO in Betrieb. Er kann mit einem UKW-Radio abgehört werden.

des Oszillators hin- und herschwankt. Der Oszillator wird also frequenzmoduliert. Da unser UKW-Radio darauf eingerichtet ist, FM-Signale zu demodulieren, hören wir nicht wie bei unseren früheren FM-Versuchen ein unverständliches Jaulen, sondern klare Sprache. Das Radio mit seiner Antenne kann vorsichtig von unserem Experimentieraufbau entfernt werden, um die Reichweite zu testen. Auf gar keinen Fall dürfen wir eine Antenne an unseren Experimentieraufbau anschließen. Hier auf den höheren Frequenzen ist nämlich alles viel kritischer. Jedes Drähtchen, und sei es noch so kurz, bewirkt bereits ein Abstrahlen! Und bitte bedenkt: Wir befinden uns jetzt wesentlich näher am Flugfunkband!

Übermodulation

Wir drehen Poti P1 etwas weiter auf und sprechen auch etwas lauter. Die Sprache im Lautsprecher des Empfängers klingt verzerrt und kratzig. Der Sender wird übermoduliert, d.h. die Frequenz des Senders wird weiter hin- und hergezerrt, als es der

ßere Spannung am Detektor abliefern. Wird er dagegen durch die Modulation nach unten verstimmt, ist er noch schlechter eingestellt und liefert entsprechend weniger Spannung am Gleichrichter ab. Dadurch wird die Frequenzänderung in eine Amplitudenänderung umgesetzt, und diese sich ändernde Spannung wird nun endlich wie eine AM-Spannung gleichgerichtet (Bild 260).



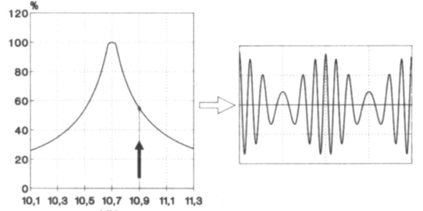


Bild 260. Flankendemodulation: Wenn man einen AM-Empfänger nicht genau (auf die Spitze der Resonanzkurve) auf einen FM-Sender einstellt, wandelt sich die Frequenzmodulation in eine Amplitudenmodulation um.

Es ist also möglich, mit einem ganz normalen AM-Empfänger FM-Sendungen aufzunehmen,

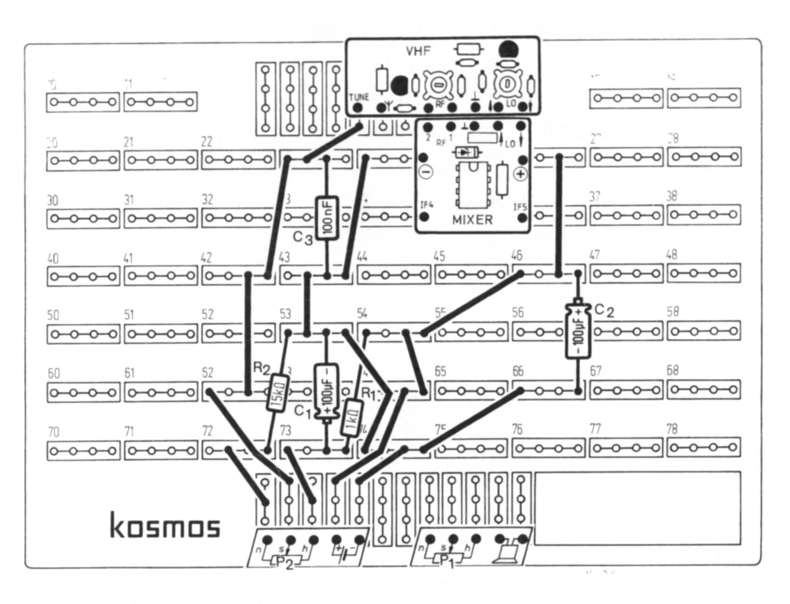


Bild 261. Aufbau zu Schaltung 259.

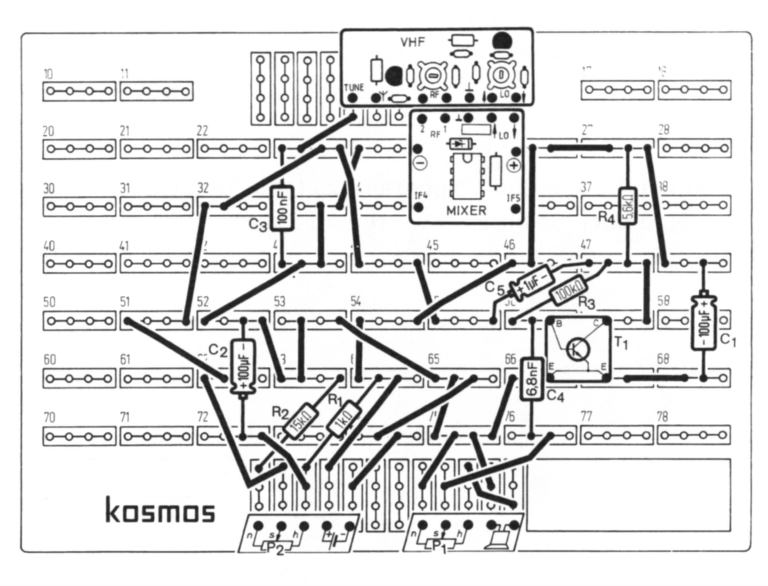


Bild 263. Aufbau zu Schaltung 262.

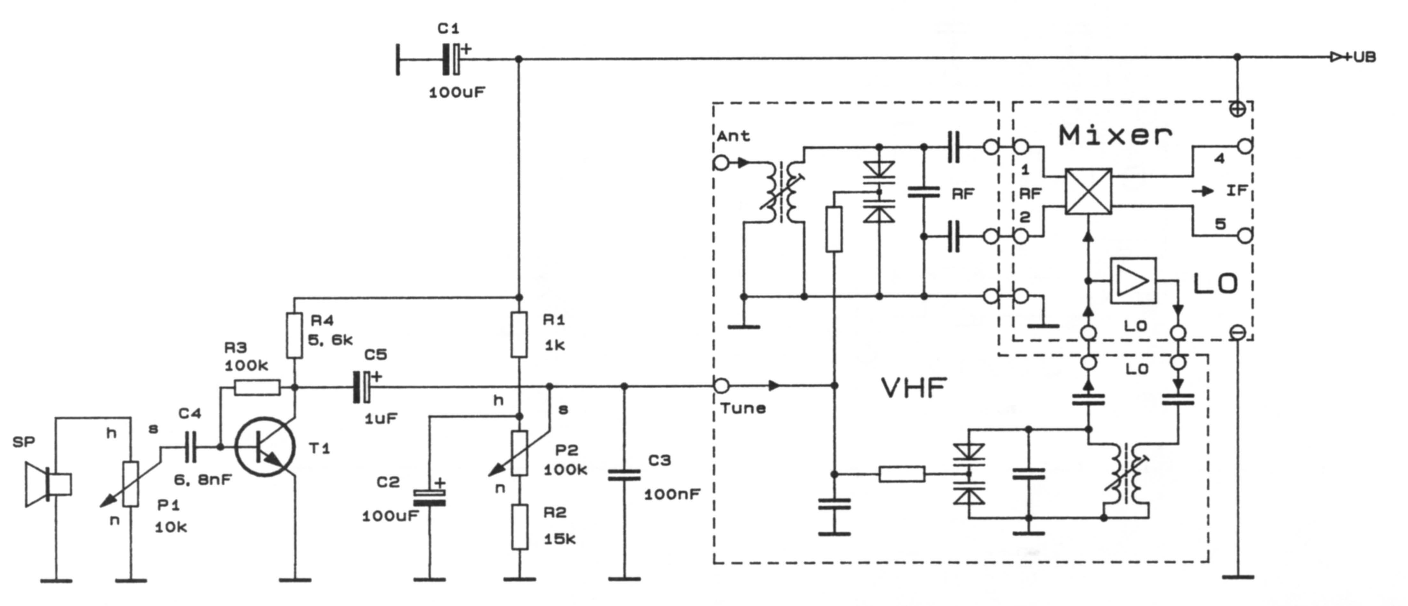


Bild 262. Ein UKW-FM-Sender. Mit P2 wird die Sendefrequenz und mit P1 die Stärke der Modulation eingestellt.

wenn man nicht genau auf den Sender abstimmt. Allerdings kann man dann die Vorteile der FM nicht ausnutzen. Ein richtiger FM-Demodulator heißt auch Diskriminator und funktioniert anders.

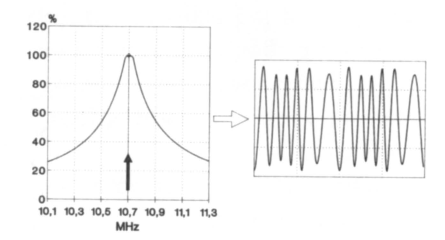


Bild 264. Wird der FM-Sender dagegen genau eingestellt, so verschwindet in einem AM-Empfänger die Modulation.



Know-how: Schwingkreise aus Stein und Porzellan

Wir sprachen immer von einem Schwingkreis; aber wo ist denn auf dem IF-Modul ein Schwingkreis? Dieses kleine Lutschbonbon etwa...? Bestimmte Materialien (z.B. Quarz) zeigen den piezoelektrischen Effekt. Hinter diesem tollen Namen steckt eine erstaunliche Eigenschaft der Natur. Drückt man den Quarz,

Empfänger verkraften kann. Das modulierte Signal darf nur höchstens so weit von der Ruhelage (der Trägerfrequenz) abgelenkt werden, wie es die Bandbreite des Empfängers zuläßt.

UKW-Empfänger

Wer hört heute noch Mittelwellensender? Die höhere Qualität hat mittlerweile auch die konservativsten Radiofreunde in den UKW-Bereich gelockt! Wir entfernen aus dem Versuchsaufbau des Senders den Modulationsverstärker und erweitern ihn um ein Zwischenfrequenz-Filter (10,7 MHz-Modul), einen Zwischenfrequenz-Verstärker mit Demodulator (das IF-Modul) und einen Niederfrequenzverstärker (das AMP-Modul) zu einem vollständigen Empfänger (Bild 266). Die Drahtbrücke X wird zunächst noch nicht eingesteckt. Mit P2 wird die Frequenz verändert und ein Sender gesucht. Es sollte mindestens ein starker Sender durchschlagen. Sofern wirklich nichts zu hören ist, kann der Kern

Bild 265. UKW-FM-Super. Zum Abgleich des Diskriminators wird die Drahtbrücke X zunächst noch nicht eingesteckt.

so entsteht an seinen Oberflächen eine geringe elektrische Spannung. Keramische Werkstoffe zeigen diesen Effekt in wesentlich stärkerem Maße als andere. Das bekannteste Beispiel sind wohl Feuerzeuge, die den Zündfunken nicht mit einem gewöhnlichen Feuerstein erzeugen, sondern bei denen der Druck auf den Auslöser auf einen kleinen piezokeramischen Kristall übertragen wird. Der erzeugt dadurch mehrere tausend Volt, die sich in einem knisternden Funken entladen und so das Gas zünden. Dieser Effekt ist auch umkehrbar: Legt man eine Spannung an den Quarz oder den keramischen Kristall, so reagiert er mit einer geringfügigen Längenänderung. Die besondere Bedeutung für die Radiotechnik liegt darin, daß die Kristalle bei einer Wechselspannung mitschwingen können und dabei eine sehr deutliche Resonanz zeigen. Diese Resonanz ist gegenüber normalen Schwingkreisen außerordentlich scharf. Die Resonanzfrequenz wird durch die mechanischen Abmessungen des Kristalls bei der Fertigung festgelegt. Ein solcher Knirps entspricht also einem Schwingkreis

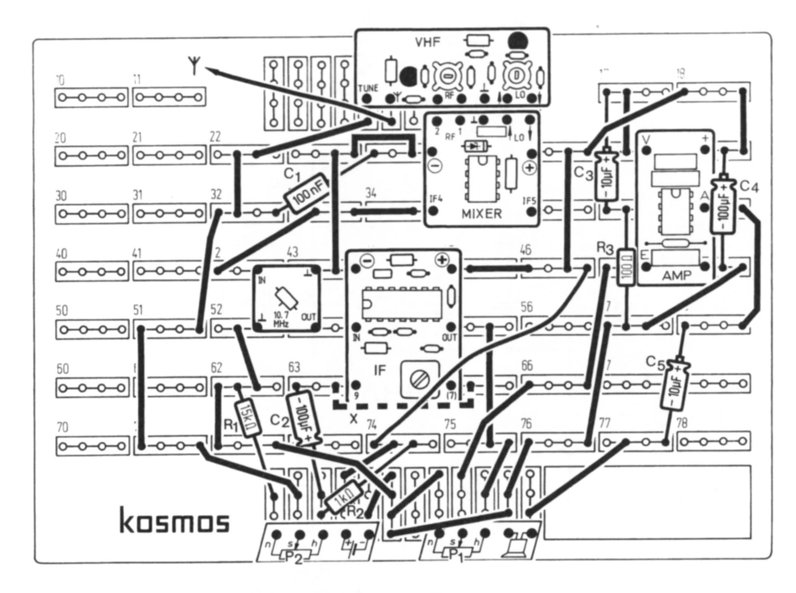


Bild 266. Aufbau zu Schaltung 265.

der mit RF bezeichneten Spule auf dem VHF-Modul etwas verdreht werden und erneut durch langsames Durchdrehen von P2 nach einem Sender gesucht werden. Unter Umständen ist dieser Vorgang mehrfach zu wiederholen. Da die Selektion des 10,7 MHz-Moduls sehr gut ist, kann man leicht durch zu schnelles Drehen über den empfangenen Sender hinwegkurbeln: Also bitte P2 nur mit äußerstem Feingefühl bedienen. Sobald ein Sender gefunden ist, wird mit der RF-Spule auf besten Empfang eingestellt.

Zwei Empfangsstellen

Wenn wir einen Sender ganz vorsichtig einstellen, werden wir bemerken, daß seine Lautstärke zunächst zunimmt, plötzlich abnimmt und beim Weiterdrehen in derselben Richtung wieder zunimmt, um schließlich wieder im Rauschen zu verschwinden. Jeder Sender ist also offenbar zweimal dicht nebeneinander zu hören. Der Versuch gelingt am besten mit einem Sender im oberen Teil des Abstimmbereiches (Einstellung von P2 bei etwa „4...5").

Dabei wird das frequenzmodulierte Signal an den Flanken des IF-(ZF-)Filters demoduliert. Da ein Schwingkreis bekanntlich zwei Flanken hat, erscheint auch der Sender zweimal auf der Skala.

Abgleich des Diskriminators

Jetzt wird das technische Fingerspitzengefühl des Experimentators auf das Äußerste gefordert. Für den nachfolgenden Abgleich ist es von größter Bedeutung, daß die Frequenzabstimmung mit dem Poti P2 so vorgenommen wird, daß ein Sender genau auf die kleine Lücke zwischen den beiden Stellen mit der größten Lautstärke abgestimmt wird (Bild 264). Auch hier funktioniert es am besten mit einem Sender in der oberen Hälfte des Abstimmbereiches. Bitte die Einstellung mehrfach kontrollieren, wir dürfen nicht neben den Sender abgestimmt haben! Wenn wir sicher sind, daß die Einstellung korrekt ist, wird die Drahtbrücke X eingesteckt. Dadurch wird der Phasenschieber (ein Schwingkreis) auf dem IF-Modul in Betrieb genommen. Mit einem schmalen Schraubendreher wird der Kern der Spule des IF-Moduls so verstimmt, bis wir den Sender in maximaler Lautstärke hören. Wir haben jetzt zwischen den beiden Flankendemodulationen eine richtige FM-Demodulation.

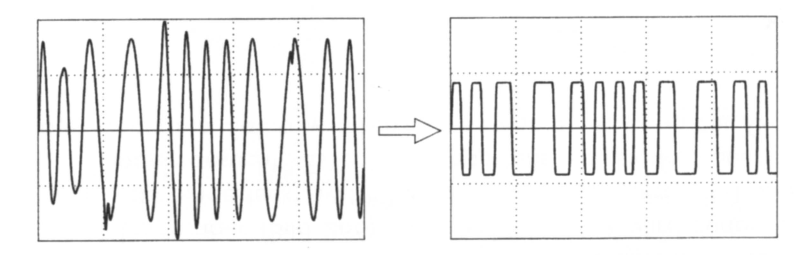


Bild 267. In einem begrenzenden Verstärker werden die Störungen wie mit einem Hobel abgeschnitten. Da der Nachrichteninhalt in der Frequenzänderung steckt, sind alle FM-Sender – egal ob sie schwach oder stark einfallen – gleich laut. Nur am Rauschen ist die Entfernung zum Sender zu erkennen.

von ungewöhnlich hoher Güte. Damit lassen sich phantastisch steile Filter zusammenbauen. Auf unserem 10,7 MHz-Modul ist ein solches piezokeramisches Filter aufgebaut. Dieser Winzling hat eine Selektion, die mindestens genauso gut ist wie die der „ZF-Dampfer" der früheren UKW-Empfänger. Einen ZF-Dampfer nannte man eine Kette von Schwingkreisen und Röhren. Dies gab den Radios alter Prägung eine imponierende Größe. Der Nachteil der keramischen Filter soll auch nicht verschwiegen werden. Sie haben eine sehr hohe Einfügungsdämpfung; es kommt also viel weniger heraus, als man hineinsteckt. Aber das macht ein moderner Halbleiterverstärker wie unser IF-Modul wieder spielend wett.



Know-how: Synchrondetektor mit 90° Phasenverschiebung

Das IF-Modul enthält neben einem achtstufigen Verstärker ebenfalls einen – uns wohlbekannten – Doppelgegentakt-

Paarlauf der Dioden – Abstimmung des Antennenkreises

Da die Kapazitätsdioden zwangsweise an derselben Abstimmspannung liegen, führen sie auch beide gemeinsam ihre Kapazitätsänderung durch. Damit der Antennenkreis auch immer möglichst genau um die Zwischenfrequenz versetzt mit dem LO-Kreis mitläuft, muß noch die RF-Spule abgeglichen werden. Nachdem mit P2 ein Sender möglichst klar eingestellt wurde, wird der RF-Schwingkreis auf dem VHF-Modul nachgedreht. Im Gegensatz zum Abstimmen auf einen AM-Sender wird dabei die Lautstärke nicht unbedingt größer, sondern der Sender hebt sich meist nur besser über das Rauschen hinaus, einfach dadurch, daß beim genaueren Abstimmen das Rauschen zurückgeht. Nachdem der RF-Schwingkreis grob abgestimmt ist, sollten schon mehrere Sender zu hören sein. Wir wiederholen den Abgleich der RF-Spule mit Sendern, die möglichst an der unteren wie an der oberen Grenze des Abstimmbereiches liegen. Wenn sich dadurch eine wesentlich andere Einstellung der Spule ergibt, wird sie auf eine Stellung zwischen den beiden gefundenen Werten eingestellt. Man muß halt auch mal Kompromisse schließen können.

Europiep: Personenruf am Bandanfang

In den meisten Gebieten Deutschlands ist am Anfang des Abstimmbereiches ein eigenartiges Gejaule zu hören. Dieser Sender arbeitet nicht mehr im Rundfunkband, er befindet sich bereits unterhalb davon. Es ist das europäische Personenrufsystem. In einer Art Morsetelegramm wird ein bestimmter Code ausgestrahlt, der automatisch den Empfänger mit der gewünschten Adresse, und nur diesen, piepen läßt. Obwohl alle Empfänger auf dieselbe Frequenz abgestimmt werden, kann man selektiv wie beim Telefon eine ganz bestimmte Nummer anwählen. Natürlich nicht gleichzeitig sondern nur nacheinander. Wir können die Frequenz des „Europiepsenders" als Eichmarke benutzen, um den Anfang unseres Abstimmbereiches genau an den Anfang des Rundfunkbandes zu legen. Dazu wird P2 auf Null eingestellt und an der LO-Spule so lange gedreht, bis der Europiep wieder zu hören ist. Dann muß aber natürlich auch die RF-Spule erneut eingestellt werden.

Zündfunkenstörung

Um Zündfunken zu simulieren, benutzen wir eine zweite Batterie und die Induktivität des Ohrhörers, indem wir mit den Anschlußdrähten des Hörers auf die Pole der Batterie tippen. Zunächst stellen wir unseren UKW-Empfänger zwischen zwei Rundfunksender ein, d.h. im Lautsprecher sollte zunächst nur Rauschen zu hören sein. Die Funkstörungen sind deutlich im Lautsprecher als Knacken zu hören. Nun stellen wir einen Sender ein und versuchen erneut unser Glück. Die Störungen sind durch die Begrenzung wie weggeblasen!

Spannungsgesteuerter Oszillator VCO

Der Oszillator wird durch eine Spannung in der Frequenz verändert. Es ist somit ein spannungsgesteuerter Oszillator oder englisch ein **V**oltage **C**ontrolled **O**scillator (VCO). Ein solcher VCO stellt extreme Anforderungen an die Reinheit der Abstimmspannung. Jeder Kratzer des Potis, jeder eingefangene Brumm äußert sich sofort in einer Frequenzmodulation. Deshalb muß die Abstimmspannung besonders gut gesiebt sein und wenn möglich als abgeschirmte Leitung verlegt werden.

Kitzlig: Die Abstimmspannung eines VCO

Wir entfernen die beiden Abklatschkondensatoren C1 und C2 in Aufbau 266, die für die Reinhaltung der Abstimmspannung verantwortlich sind. Spätestens nachdem wir mit P1 die Lautstärke erhöht haben, klingt das Radio gar nicht mehr schön. Jaulen, Pfeifen und Knurren sind übliche Erscheinungen. Wir wissen schon: Das AMP-Modul läßt aufgrund seines hohen Stromverbrauches die Batteriespannung wackeln. Diese Spannungsschwankungen übertragen sich auf die Abstimmspannung und modulieren den LO in der Frequenz. Diese zusätzliche Frequenz-

modulator. Ich habe ja versprochen, daß mit diesem Bauteil so ziemlich alles zu realisieren ist. Ein sogenannter Koinzidenzdemodulator (frei übersetzt: Gleichzeitigkeitsdemodulator) ist dem Wesen nach auch ein Synchrondetektor, wie wir ihn zur Demodulation von AM benutzt haben. Aber, und das ist der eigentliche Trick, die durch die Transistoren dargestellten Schalter arbeiten nicht genau in Phase zum ankommenden Signal wie bei der AM-Demodulation, sondern um 90 ° phasenverschoben. Zur Phasenverschiebung dient ein Schwingkreis, der bei Resonanzfrequenz genau 90 ° Phasenverschiebung hat. Dann kommt aus dem Demodulator nämlich nichts heraus. Soviel Aufwand um nichts? Natürlich nicht, denn bei allen anderen Frequenzen, bei denen die Phasenverschiebung kleiner oder größer als 90 ° ist, erscheint am Ausgang eine Spannung. Negative Spannung bei niedrigeren Frequenzen, positive bei höheren Frequenzen. Dadurch entspricht die Ausgangsspannung des Demodulators nicht der Amplitude, sondern der Frequenz des Signals.

modulation wird natürlich ebenfalls auf dem IF-Modul demoduliert und als tonfrequente Wechselspannung vom AMP-Modul erneut verstärkt.

9. Atennenkunde

Faltdipol

Ein Faltdipol läßt sich sehr einfach aus einer 1,5 m langen Latte (= halbe Wellenlänge) und einem Draht herstellen. In die Mitte der Latte drücken wir dicht benachbart zwei Reißbrettstifte, um die der Draht einmal herumgeschlungen wird. Die gesamte Drahtlänge, die wir brauchen, ergibt sich aus den rund 3 Metern für die eigentliche Antenne – da der Draht einmal um die gesamte Latte laufen muß – und der doppelten Zuleitungslänge. Den genauen Aufbau zeigt Bild 268.

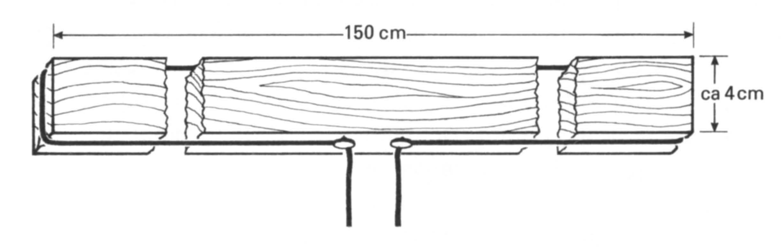


Bild 268. Ein Faltdipol zum Selbstbauen: Eine 1,5 m lange und ca. 4 cm breite Dachblatte wird an den Enden eingekerbt und einmal mit Draht umwickelt. Die Anschlüsse zum Empfänger werden mit Reißzwecken fixiert.

Nachdem die Antenne am UKW-Empfänger angeschlossen ist, muß sie auf den Sender ausgerichtet werden. Wie bei der Ferritantenne ergibt sich der beste Empfang, wenn die Antenne mit der Längsseite zum Empfänger steht. Aber auch hier ergibt sich eine Doppeldeutigkeit. Der Sender kann von jeder Seite auf die Antenne einfallen.

Antenne – Der beste HF-Verstärker

Aufgrund der „handlichen" Wellenlänge von nur 3 Metern hat man es nicht mehr nötig, die zweite Antennenhälfte am Erdboden zu spiegeln wie bei Mittelwelle. Jeder Senderanschluß erhält jetzt einen eigenen Antennendraht. Da also zwei Pole angeschlossen werden, spricht an von einer Dipolantenne (Bild 269).

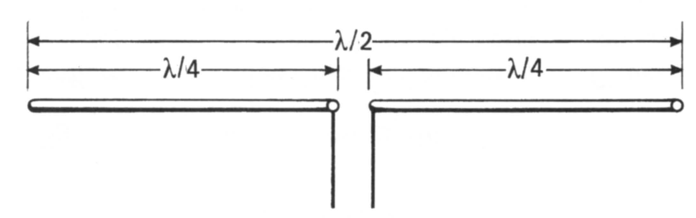


Bild 269. Die Gesamtlänge einer Dipolantenne entspricht der halben Wellenlänge. Für UKW-Rundfunk ist sie also 1,5 m lang.

Jeder Antennendraht ist eine viertel Wellenlänge lang. Nach Adam Riese und Eva Zwerg entspricht die gesamte Atennenlänge damit der halben Wellenlänge. Man spricht deshalb von einem Halbwellendipol. Jeder Verstärker rauscht! Am wenigsten verrauscht ist ein Signal am Empfängereingang! Eine gute Antenne verstärkt ein Signal ohne jedes zusätzliche Rauschen.

Richtantennen

Natürlich kennt jeder die „Rechen" auf den Hausdächern. Fernsehantennen und UKW-Rundfunkantennen werden nach dem Prinzip der Yagiantenne aufgebaut (Bild 270).

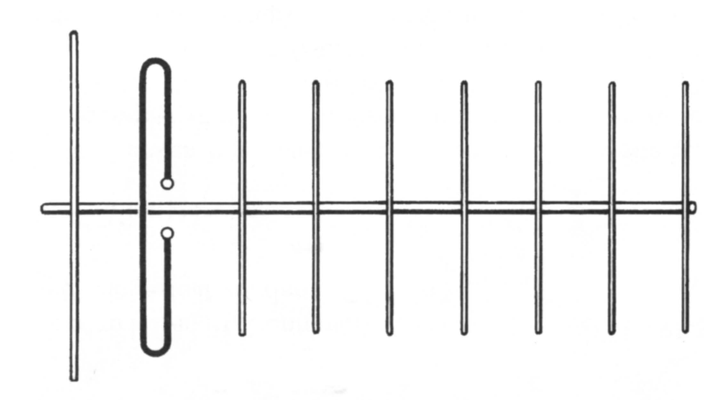


Bild 270. Eine Yagi-Antenne ist eine sehr leistungsfähige Richtantenne. Sie besteht neben dem Dipol, meist ein Faltdipol, aus einem Reflektor und mehreren Direktoren.



Know-how: Weniger Störungen durch Begrenzung

Ein FM-Zwischenfrequenzverstärker – wie das IF-Modul – hat eine extrem hohe Verstärkung. Selbst ganz schwache Sender werden so weit verstärkt, daß ihre Signalamplitude oben und unten begrenzt wird. Für die AM wäre das tödlich, sie würde regelrecht wegverstärkt. Aber selbst wenn bei ganz schwach einfallenden Sendern noch die Modulation zu hören ist, würde es völlig verzerrt klingen. Nicht so bei der FM. Hier steckt der Nachrichteninhalt ausschließlich in der Frequenzänderung. Deshalb können die Amplituden hart begrenzt werden. Alle Störer, die als eine Art Amplitudenmodulation auf der Amplitude sitzen, werden wie durch einen großen Hobel einfach abgeschnitten und können deshalb nicht mehr wirksam werden (Bild 267).

Der Japaner Yagi ordnete parallel zum Dipol weitere Antennen an, die aber nicht angeschlossen sind. Wenn der zusätzliche Antennendraht einige Prozent länger als der Dipol ist, werden die Wellen an ihm reflektiert und zurückgeworfen.

10. Die Zukunft hat schon begonnen

Von dem unglaublichen „Platz", den man auf UKW vorfand, ist heute natürlich keine Rede mehr. Immer mehr neue Sender und Programmanbieter treten auf den Markt. Die freien Frequenzen reichen bei weitem nicht mehr aus. Es werden deshalb immer höhere Frequenzbereiche erschlossen. Die Strahlung wird dabei immer mehr der optischen Wellenausbreitung ähnlicher. Das geht soweit, daß auch die „Sicht" eines Senders bei Regenwetter schlechter ist als bei klarer Atmosphäre. Die Reichweite dieser Sender im GHz-Bereich ist deshalb bedeutend geringer. Da aber unsere Lufthülle eigentlich nur eine hauchdünne Schale ist, würde diese Dämpfung eine wesentlich geringere Rolle spielen, wenn die Wellen nicht längs der Erdoberfläche durch sie hindurch müßten, sondern von einem riesigen Funkturm von oben her durch die Erdatmosphäre gestrahlt würden. Der Funkturm müßte so hoch sein, daß seine Antenne von einem großen Teil der Erdoberfläche aus gesehen werden könnte. Dann käme man mit einem einzigen Sender aus, den alle Empfangsgeräte, egal ob in München oder in Hamburg, empfangen könnten. Natürlich kann man nicht derart hohe Türme bauen, aber ein Satellit, der am Himmel scheinbar stillsteht, leistet das gleiche.

Warum fällt ein Satellit nicht vom Himmel?

Natürlich wirkt auch auf einen Satelliten die Erdanziehungskraft, aber er kreist so schnell um die Erde, daß ihn die Fliehkraft nach draußen ins Weltall ziehen will. Der raffinierte Trick besteht jetzt darin, die Geschwindigkeit des Satelliten so zu wählen, daß sich Erdanziehungskraft und Fliehkraft die Waage halten. Einmal hochgeschossen, kann der Satellit ganz ohne Eigenantrieb um die Erde fliegen, denn oberhalb der Atmosphäre gibt es keinen nennenswerten Luftwiderstand, der ihn abbremsen würde. Um einen am Himmel scheinbar stillstehenden Satelliten zu erhalten, nutzt man die Tatsache aus, daß sich unsere Erde in 24 Stunden einmal um sich selbst dreht. Wenn die Umlaufzeit des Satelliten ebenfalls 24 Stunden beträgt, ist er von der Erde aus gesehen stationär. Für eine Umlaufzeit von exakt 24 Stunden heben sich Fliehkraft und Erdanziehungskraft bei einem Radius der Kreisbahn von 36 000 km gerade auf. Deshalb heißt diese Umlaufbahn geostationärer Orbit und die Satelliten auf ihr Synchronsatelliten. Weil sie scheinbar still am Himmel stehen, kann man die Antennen fest auf sie ausrichten.

Fernmelde- und TV-Satelliten

Das erste interkontinentale Telefongespräch von Deutschland nach Amerika gelang im Jahre 1928. Es war eine Kurzwellenfunkverbindung, die immer sehr starken Schwankungen ausgesetzt ist. Eine technisch bessere, wenn auch sehr teure Lösung stellte das erste Telefon-Transatlantikkabel Mitte der 50er Jahre dar. Die erste Fernsehübertragung über einen Nachrichtensatelliten gelang 1962 (Telstar). Aufgrund der großen Entfernung zum Satelliten und aufgrund der geringen Sendeleistung im Satelliten mußten bei den Erdfunkstellen riesige Antennen verwendet werden. Deshalb diente die Satellitenverbindung ausschließlich als Bindeglied zwischen zwei großen Erdfunkstellen. Von dort aus wurden die Programme meist mittels Richtfunk oder Kabel zu terrestrischen Sendern übertragen und dort für jedermann ausgestrahlt. Neuerdings ist man in der Lage, Satelliten mit solch großen Sendeleistungen auszurüsten, daß auch der direkte Einzelempfang mit kleinen Antennen möglich ist. Solche direktstrahlenden Fernsehsatelliten wirken also wie ein unendlich hoher Funkturm.

Wie funktioniert ein Fernmeldesatellit?

Ein Fernmeldesatellit besitzt eine Sende- und eine Empfangsantenne. Er empfängt die Signale der Sendestation und setzt sie – wie ein Super – in einen anderen Frequenzbereich um. Dort werden die Signale kräftig verstärkt und zur Erde zurück-

gesendet. Um einen Eindruck von den enormen technischen Schwierigkeiten zu bekommen, hier nur eine einzige Zahl: Von der beim Satellit abgestrahlten Leistung kommt nur noch der 300 000 000 000 000 000 000ste Teil auf der Erde an. Natürlich sind solche Zahlenbandwürmer absolut nichtssagend. Deswegen hier nochmal der schwache Versuch eines (un)anschaulichen Vergleiches: Wenn wir die Sendeleistung des Satelliten mit der Entfernung Erde – Sonne (150 Millionen km) gleichsetzen, so würde die auf der Erde vom Satelliten empfangene Leistung nur einer Strecke von etwa 5 millionstel mm entsprechen. Außer der Verwendung sehr guter Verstärker ist diese unglaubliche technische Meisterleistung in erster Linie auf die Verwendung von Parabolantennen zurückzuführen.

Wie funktioniert eine Parabolantenne?

Ähnlich dem Prinzip eines Hohlspiegels werden die Funkstrahlen so reflektiert, daß sie im Brennpunkt der Parabolantenne stark gebündelt werden. Auf diese Weise wird das Signal ohne aktive Verstärker bereits um das 10 000fache verstärkt. Man kann den Empfänger direkt im Brennpunkt der Antenne anordnen oder die Funkstrahlen von dort mittels eines zweiten Spiegels (dem Fangreflektor) in den Empfänger leiten.

Wie wird es weitergehen?

Bei einem derart hohen Standard der Telekommunikations- und Radiotechnik scheint es schwer vorstellbar, daß es noch wesentliche Verbesserungen geben wird. In erster Linie wird man die Qualität der übermittelten Nachrichten verbessern. Mit Einführung der digitalen Modulationsverfahren werden bald Rundfunkübertragungen in der gleichen Qualität wie bei einem CD-Player möglich sein. Auch dem Fernsehbild wird zu mehr 'Ansehnlichkeit" durch höhere Auflösung des Bildes verholfen werden. Dabei werden die Geräte mit immer größerem Bedienungskomfort versehen sein; bereits heute kann man die Empfangsfrequenz durch die Verwendung von PLL-Schaltungen direkt eintippen. Ob der Programminhalt weiterhin direkt von Satelliten ausgestrahlt wird oder ob es zweckmäßiger ist, ihn per Glasfaserkabel in die Wohnung zu bringen, läßt sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht endgültig beantworten. Wahrscheinlich werden beide Systeme nebeneinander existieren. Die Kopfstationen der Kabelfernsehanlagen empfangen bereits heute das Programm der TV-Satelliten und speisen es in die Netze ein. Mit der Nachrichtenübertragung über Glasfasern und der Anwendung von PLL-Schaltungen befaßt sich der KOSMOS Experimentierkasten „High-tech" ausführlich. Es bleibt zu hoffen, daß die immer besseren Fernmeldenetze zu einem immer besseren Kennenlernen der Völker unseres Planeten führen werden. Seit der ersten Rundfunkübertragung ist die Welt nicht mehr das, was sie vorher war: Wir wissen mehr voneinander! Wir werden in nicht allzuferner Zukunft in der Lage sein, zu jeder Zeit mit jedem anderen Partner, egal in welchem Land, eine Verbindung aufzubauen. Vielleicht werden die Fernmeldenetze so etwas wie ein Nervensystem der Menschheit und helfen so, Mißverständnisse abzubauen und vielleicht sogar Kriege zu verhindern.

